

**ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ**

Том 331, № 12, 2020

ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА. ИНЖИНИРИНГ ГЕОРЕСУРСОВ

Редакционная коллегия

Семилетов И.П., гл. редактор, д-р геогр. наук (Россия)
Остальд Р.В., канд. хим. наук (Россия)
Савичев О.Г., д-р геогр. наук (Россия)
Покровский О.С., канд. геол.-минерал. наук (Франция)
Старостенко В.И., д-р физ.-мат. наук (Украина)
Контарович А.Э., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Белозеров В.Б., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Никитенков Н.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Силкин В.М., д-р физ.-мат. наук (Испания)
Коротеев Ю.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Уленев О.Н., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Борисов А.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Коршунов А.В., д-р хим. наук (Россия)
Пестряков А.Н., д-р хим. наук (Россия)
Тойпель У., Dsc (Германия)
Джин-Чун Ким, Dsc (Южная Корея)
Ильин А.П., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Заворин А.С., д-р техн. наук (Россия)
Ханьялич К., Dsc (Нидерланды)
Маркович Д.М., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Алексеев С.В., д-р физ.-мат. наук (Россия)
Воропай Н.И., д-р техн. наук (Россия)
Кочегуров А.И., канд. техн. наук (Россия)
Руи Д., PhD (Португалия)
Зиятдинов Р.А., канд. физ.-мат. наук (Южная Корея)
Спицын В.Г., д-р техн. наук (Россия)
Муравьев С.В., д-р техн. наук (Россия)
Пойлов В.З., д-р техн. наук (Россия)
Лотов В.А., д-р техн. наук (Россия)
Софронов В.Л., д-р хим. наук (Россия)
Бузник В.М., д-р хим. наук (Россия)
Захаров Ю.А., д-р хим. наук (Россия)
Антипенко В.Р., д-р хим. наук (Россия)
Голик В.И., д-р техн. наук (Россия)
Абуталипова Е.М., д-р техн. наук (Россия)
Полищук В.И., д-р техн. наук (Россия)
Хамитов Р.Н., д-р техн. наук (Россия)
Зюев А.М., д-р техн. наук (Россия)
Третьяк А.Я., д-р техн. наук (Россия)
Арбузов С.И., д-р геол.-минерал. наук (Россия)
Ковалев В.З., д-р техн. наук (Россия)
Романенко С.В., д-р хим. наук (Россия)
Кириянова Л.Г., канд. филос. наук (Россия)
Глазырин А.С., выпуск. редактор, д-р техн. наук (Россия)

Входит в Перечень ВАК РФ – ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 18054

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020

УВАЖАЕМЫЕ ЧИТАТЕЛИ!

Журнал «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» – рецензируемый научный журнал, издающийся с 1903 года.

Учредителем является Томский политехнический университет.

Журнал зарегистрирован Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций – Свидетельство ПИ № ФС 77-65008 от 04.03.2016 г.

ISSN (print) – 2500-1019
ISSN (on_line) – 2413-1830

Пятилетний импакт-фактор РИНЦ за 2015 г. – 0,339
(без самоцитирования – 0,287)

«Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов» публикует оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области геологии, разведки и добычи полезных ископаемых, технологии транспортировки и глубокой переработки природных ресурсов, энергоэффективного производства и преобразования энергии на основе полезных ископаемых, а также безопасной утилизации геоактивов.

Журнал представляет интерес для геологов, химиков, технологов, физиков, экологов, энергетиков, специалистов по хранению и транспортировке энергоресурсов, ИТ-специалистов, а также ученых других смежных областей.

Тематические направления журнала «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов»:

- Прогнозирование и разведка георесурсов
- Добыча георесурсов
- Транспортировка георесурсов
- Глубокая переработка георесурсов
- Энергоэффективное производство и преобразование энергии на основе георесурсов
- Безопасная утилизация георесурсов и вопросы геоэкологии
- Инженерная геология Евразии и окраинных морей

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях.

Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (слепое) рецензирование.

Автор статьи имеет право предложить двух рецензентов по научному направлению своего исследования.

Окончательное решение по публикации статьи принимает главный редактор журнала.

Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе.

Журнал издается ежемесячно.

Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах www.elibrary.ru, scholar.google.com

**BULLETIN
OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY
GEO ASSETS ENGINEERING**

Volume 331, № 12, 2020

BULLETIN OF THE TOMSK POLYTECHNIC UNIVERSITY. GEO ASSETS ENGINEERING

Editorial Board

Semiletov I.P., editor in chief, Dr. Sc. (Russia)
Ostvald R.V., Cand. Sc. (Russia)
Savichev O.G., Dr. Sc. (Russia)
Pokrovsky O.S., Cand. Sc. (France)
Starostenko V.I., Dr. Sc. (Ukraine)
Kontorovich A.E., Dr. Sc. (Russia)
Belozarov V.B., Dr. Sc. (Russia)
Nikitenkov N.N., Dr. Sc. (Russia)
Silkin V.M., PhD (Spain)
Koroteev Yu.M., Dr. Sc. (Russia)
Ulenekov O.N., Dr. Sc. (Russia)
Borisov A.M., Dr. Sc. (Russia)
Korshunov A.V., Dr. Sc. (Russia)
Pestryakov A.N., Dr. Sc. (Russia)
Teipel U., Dsc (Germany)
Jin-Chun Kim, Dsc (South Korea)
Ilyin A.P., Dr. Sc. (Russia)
Zavorin A.S., Dr. Sc. (Russia)
Hanjalic K., Dsc (Netherlands)
Markovich D.M., Dr. Sc. (Russia)
Alekseenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Voropai N.I., Dr. Sc. (Russia)
Kochegurov A.I., Cand. Sc. (Russia)
Rui D., PhD (Portugal)
Ziatdinov R.A., Cand. Sc. (South Korea)
Muravyov S.V., Dr. Sc. (Russia)
Spitsyn V.G., Dr. Sc. (Russia)
Poilov V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Lotov V.A., Dr. Sc. (Russia)
Sofronov V.L., Dr. Sc. (Russia)
Bouznik V.M., Dr. Sc. (Russia)
Zakharov Yu.A., Dr. Sc. (Russia)
Antipenko V.R., Dr. Sc. (Russia)
Golik V.I., Dr. Sc. (Russia)
Abutalipova E.M., Dr. Sc. (Russia)
Polishchuk V.I., Dr. Sc. (Russia)
Khamitov R.N., Dr. Sc. (Russia)
Zyuzev A.M., Dr. Sc. (Russia)
Tretyak A.Ya., Dr. Sc. (Russia)
Arbuzov S.I., Dr. Sc. (Russia)
Kovalev V.Z., Dr. Sc. (Russia)
Romanenko S.V., Dr. Sc. (Russia)
Kiryanova L.G., Cand. Sc. (Russia)
Glazyrin A.S., managing editor, Dr. Sc. (Russia)

AIMS AND SCOPE

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is peer-reviewed journal owned by Tomsk Polytechnic University.

The journal was founded in 1903.

The journal is registered internationally (ISSN 2413-1830) and nationally (Certificate PE no. FM 77-65008, March 04, 2016 from the RF Ministry of Press, Broadcasting and Mass Communications).

ISSN (print) – 2500-1019

ISSN (on-line) – 2413-1830

The journal publishes research papers in the field defined as "life cycle of georesources". It presents original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in geology, exploration and extraction of mineral resources, transportation technologies and deep processing of natural resources, energy-efficient production and energy conversion based on mineral resources as well as on safe disposal of geo assets.

The journal will be of interest to geologists, chemists, engineers, physicists, ecologists, power engineers, specialists in storage and transportation of energy resources, IT specialists as well as to other specialists in the related fields.

Scope of the journal issue "Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering" in accordance with Geo Assets (GA) strategy includes:

- Geo Assets exploration and refining;
- Geo Assets mining and transportation;
- Geo Assets deep processing;
- Energy-efficient production and conversion of energy based on Geo Assets;
- Safe disposal of Geo Assets and Geoecology issues;
- Geo-engineering of Eurasia and marginal sea;
- Economic and social aspects of using Geo Assets.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication. Authors are advised to suggest two potential reviewers who are familiar with the research focus of the article. Final decision on any paper is made by the Editor in Chief.

Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering is published monthly.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on
www.elibrary.ru, scholar.google.com.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

- Формы миграции радионуклидов (U и Th) в природных водах в различных геохимических условиях на основе расчетных и экспериментальных данных**
Торопов А.С., Солдатова Е.А., Рихванов Л.П.
- Процедуры и инструментальный мониторинг процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин**
Харламов С.Н., Джангхорбани М.
- Элементный состав твердой фазы снегового покрова малых населенных пунктов (на примере села Долонь Восточно-Казахстанской области, Республика Казахстан)**
Темиржанова А.Е., Дюсембаева М.Т., Лукашенко С.Н., Язиков Е.Г., Шакенов Е.З.
- Моделирование работы погружных плунжерных насосных установок с пневмокомпенсаторами**
Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Молчанова В.А.
- Загрязнение нефтью и сопутствующими тяжелыми металлами, радионуклидами и накопление в организме гидробионтов казахстанской зоны Каспия**
Бигалиев А.Б., Кожакметова А.Н.
- Геолого-геофизические обстановки и информативность электротомографии на золоторудных месторождениях Сибири**
Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н., Гирякова Ю.Л., Ерофеева Г.В.
- Учет изменения закона фильтрации при расчете дебита газовой скважины**
Сохошко С.К.
- Планирование циклического заводнения на основе анизотропной гидродинамической модели карбонатной залежи Гагаринского месторождения**
Мартышев Д.А., Менгалиев А.Г.
- Практика отбора проб снежного покрова для химического анализа**
Янченко Н.И.
- Многокритериальный выбор режимов работы агрегатов магистральных трубопроводов при транспортировке нефти при нечеткой информации**
Оразбаев Б.Б., Оразбаева К.Н., Утенова Б.Е., Шагаева А.Б., Касимова Б.Р.
- Кинетические характеристики пиролиза биомассы**
Табакеев Р.Б., Алтынбаева Д.Б., Ибраева К.Т., Заворин А.С.
- Использование горелых пород при подземной прокладке кабельных линий связи в криолитозоне**
Галкин А.Ф., Курта И.В., Панков В.Ю.
- Сравнительный анализ реагентов-ингибиторов набухания глинистых отложений, применяемых на месторождениях Восточной Сибири**
Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Николаева М.Б., Климова А.А.
- Экогеохимический мониторинг почвенного покрова на участках алмазодобычи в Западной Якутии**
Гололобова А.Г., Легостаева Я.Б.
- Магнитные аномалии на площадке объекта мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Западная Якутия)**
Артамонова С.Ю., Шейн А.Н., Потапов В.В., Козhevnikov Н.О., Новикова П.Н., Ушницкий В.Е.
- Анализ вспенивающей активности различных видов порообразователей при синтезе пеностекла**
Гольцман Б.М.
- Forms of radionuclides (U and Th) migration in natural waters under different geochemical conditions based on computational and experimental data**
Toropov A.S., Soldatova E.A., Rikhvanov L.P.
- Procedures and instruments for monitoring processes and mechanisms of cutting transport in hydraulic cleaning of horizontal wells**
Kharlamov S.N., Janghorbani M.
- Elemental composition of snow cover solid phase in small settlements (the case of Dolon village, Republic of Kazakhstan)**
Temirzhanova A.E., Dyusembaeva M.T., Lukashenko S.N., Yazikov E.G., Shakenov E.Z.
- Simulation of operation of downhole plunger pumping installations with pneumatic compensators**
Urazakov K.R., Timashev E.O., Molchanova V.A.
- Oil pollution and associated heavy metals, radionuclides in the body of hydrobionts of the Kazakhstan zone of the Caspian sea**
Bigaliev A.B., Kozhakhmetova A.N.
- Geological-geophysical environments and efficiency of electrical tomography in Siberian gold ore deposits**
Erofeev L.Ya., Orekhov A.N., Giryakova Yu.L., Erofeeva G.V.
- Accounting for changes in the filtration law when calculating the flow rate of a gas well**
Sokhoshko S.K.
- Planning of cyclic watering based on anisotropic hydrodynamic model of the carbonate deposit of Gagarinskoe field**
Martyushev D.A., Mengaliev A.G.
- Practice of snow cover sampling for chemical analysis**
Ianchenko N.I.
- Multi-criteria selection of operating modes of main pipeline units during oil transportation with fuzzy information**
Orazbayev B.B., Orazbayeva K.N., Utenova B.E., Shagayeva A.B., Kassimova B.R.
- Kinetic characteristics of biomass pyrolysis**
Tabakaev R.B., Altynbaeva D.B., Ibraeva K.T., Zavorin A.S.
- Use of burned rocks in underground laying of cable lines in the cryolitzone**
Galkin A.F., Kurta I.V., Pankov V.Yu.
- Comparative analysis of reagents-inhibitors of swelling of clay deposits used in Eastern Siberia**
Averkina E.V., Shakirova E.V., Nikolaeva M.B., Klimova A.A.
- Geocological monitoring of soil cover on diamond mining site in Western Yakutia**
Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B.
- Magnetic anomalies at the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» (Western Yakutia)**
Artamonova S.Yu., Shein A.N., Potapov V.V., Kozhevnikov N.O., Novikova P.N., Ushnitskii V.E.
- Analysis of foaming activity of different types of foaming agents in foam glass synthesis**
Goltsman B.M.

- | | |
|--|---|
| <p>Исследования передачи силовых импульсов через резьбовые соединения бурильной колонны при вращательно-ударном бурении пилотных скважин для бестраншейной прокладки трубопроводов
 Саруев Л.А., Мельнов К.В., Шадрина А.В., Гончаров Н.В., Саруев А.Л.</p> <p>Исследование асинхронной электрической машины с короткозамкнутым ротором для возобновляемой энергетики при нестационарном конденсаторном возбуждении
 Буньков Д.С., Глазырин А.С., Боловин Е.В., Крохта Ю.В., Баннов Д.М., Ковалев В.З., Хамитов Р.Н., Кладиев С.Н., Ланграф С.В., Леонов А.П.</p> <p>Накопление бенз[а]пирена в растениях разных видов и органогенном горизонте почв степных фитоценозов при техногенном загрязнении
 Сушкова С.Н., Яковлева Е.В., Минкина Т.М., Габов Д.Н., Антоненко Е.М., Дудникова Т.С., Барбашев А.И., Минникова Т.В., Колесников С.И., Раджпут В.Д.</p> <p>Бифуркационные явления в преобразователе напряжения с частотно-импульсным управлением для ветрогенераторной установки
 Михальченко С.Г., [Михальченко Г.Я.], Семенов С.М., Мещеряков П.С., Воронина Н.А., Зиузов А.М.</p> | <p>180 Research of power impulses transfer through threaded connections of the drill-string during rotary-percussion drilling of pilot holes for trenchless pipeline laying
 Saruev L.A., Melnov K.V., Shadrina A.V., Goncharov N.V., Saruev A.L.</p> <p>187 Research of a squirrel-cage induction generator for renewable energy with non-stationary capacitor excitation
 Bunkov D.S., Glazyrin A.S., Bolovin E.V., Krokhta Yu.V., Bannov D.M., Kovalev V.Z., Khamitov R.N., Kladiev S.N., Langraf S.V., Leonov A.P.</p> <p>200 Accumulation of benzo[a]pyrene in plants of different species and organogenic horizon of soils of steppe phytocenosis under technogenic pollution
 Sushkova S.N., Yakovleva E.V., Minkina T.M., Gabov D.N., Antonenko E.M., Dudnikova T.S., Barbashev A.I., Minnikova T.V., Kolesnikov S.I., Rajput V.D.</p> <p>215 Bifurcation phenomena in voltage converter with frequency-pulse control for a wind generator
 Mikhachenko S.G., [Mikhachenko G.Ya.], Semenov S.M., Meshcheryakov P.S., Voronina N.A., Ziuzev A.M.</p> |
|--|---|

УДК 550.424.6:54.01(546.791+546.795):556.550.845

ФОРМЫ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ (U и Th) В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Торопов Андрей Сергеевич¹,
torop990@gmail.com

Солдатова Евгения Александровна²,
sea@geokhi.ru

Рихванов Леонид Петрович³

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, ул. Ленинские горы, 1.

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук,
Россия, 119991, г. Москва, ул. Косыгина, 19.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью учета разнообразия форм миграции природных радионуклидов при смене геохимических условий, а также при прогнозировании радиозоологического статуса гидрозосистем. На территории Семипалатинского испытательного полигона миграция естественных радионуклидов в водных системах слабо изучена, расчет форм миграции урана и тория при смене геохимических обстановок будет информативен для понимания миграции широкого спектра трансурановых радионуклидов.

Цель: определить формы миграции урана и тория в природных водах в зависимости от размеров частиц и с учетом широкого спектра компонентов, рассчитать формы их миграции в ручьях и озерах.

Объекты: воды ручьев горного массива Дегелен, воды озер экспериментальных площадок Семипалатинского испытательного полигона, модельные гидрогеохимические системы.

Методы. Формы нахождения природных радионуклидов исследовали *in situ* методом каскадного фракционирования природных вод. pH, Eh вод определяли методом потенциометрии, общую минерализацию – кондуктометрией. Определение основных ионов воды и отдельных элементов произведено методами титриметрии (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}), оптико-эмиссионной спектроскопии (Na, K, Ca, Mg, Fe, Si), а также ионной хроматографии (Cl^- , SO_4^{2-}). Содержание растворенных органических веществ определяли по перманганатной и бихроматной окисляемости, методом каталитического сжигания, а также по интенсивности UV сигнала. Содержание U и Th определяли методом масс-спектрометрии.

Результаты. Определены особенности переноса урана и тория в природных водах различных водных объектов Семипалатинского испытательного полигона, и обозначены определяющие их процессы. Установлено, что сульфат-ион в водах ручьев является индикатором интенсивности водообмена и скорости окисления сульфидных минералов, определяющих выход в раствор значительных концентраций урана. Уран связан с органическими и органоминеральными комплексами и подвержен трансформации форм нахождения в случае изменения геохимических условий среды. Для тория в большей степени, чем для урана, характерен коллоидный транспорт. Доминирующей миграционной формой этих элементов являются взвешенные компоненты природных вод. Отношение Th/U в растворенной форме достаточно стабильно по сравнению с коллоидными и взвешенными формами. Для вод с разным гидродинамическим режимом прослеживается отличие в степени выраженности влияния терригенной составляющей.

Ключевые слова:

Уран, торий, коллоиды, моделирование, геохимические условия, миграция, уранилкарбонат кальция, радионуклиды, минералы.

Введение

Основным путем переноса различного рода загрязнителей на дальние расстояния, в том числе и радионуклидов, является водная среда. Особое внимание в этом вопросе уделяется трансурановым радионуклидам, имеющих самое длительное пребывание в биосфере с периодом полураспада миллионы и миллиарды лет.

Поведение радионуклидов в гидрогеохимических системах является актуальной научно-практической проблемой, наряду с интенсивностью и скоростью их миграции, а также влиянием радиоэлементов на здоровье человека [1]. В настоящее время выполнено существенное количество исследований по изучению

поведения радионуклидов в экосистемах. На территории Средней Азии известны крупные месторождения урана, а также большие территории с повышенным содержанием естественных радионуклидов в почвах и горных породах, что может способствовать усиленной миграции природных радиоактивных элементов. При этом установлено, что главными параметрами, определяющими миграционный процесс, являются формы нахождения элементов и ландшафтно-геохимические условия природной среды [2].

Экологическая опасность, создаваемая повышенной естественной радиоактивностью в пригодных для использования водных ресурсах [3], имеет место, например, при эксплуатации или рекультивации от-

работанных или закрытых урановых рудников [4, 5], при разведке новых ресурсов подземных вод в Африке [6] и Ближнем Востоке [7], где соответствие питьевой воды гигиеническим нормативам по природным радиоактивным элементам довольно часто является проблемой. Поглощение урана из воды, почвы и воздуха живыми организмами в конечном итоге приводит к облучению человека. Добыча полезных ископаемых также может существенно усилить миграцию урана в результате изменения гидрологических и геохимических условий [8, 9].

Семипалатинский испытательный полигон (СИП) является одной из крупнейших мировых ядерных площадок, на которой в течение 40 лет в XX в. проводились испытания, изменившие облик данной территории и создавшие специфические условия миграции не только техногенных радионуклидов, но и многих других элементов, в значительной степени повлиявшие на перенос вещества. Ранее нами было показано, что техногенные радионуклиды (^{239}Pu , ^{241}Am и др.) в поверхностных водах СИП содержатся в существенных количествах, и даже выше гигиенических нормативов, что может представлять опасность для человека и экосистем, перемещаясь за пределы площадок испытаний [10, 11]. При этом миграция естественных радионуклидов в гидрогеохимических системах остается слабо изученной. Натурные исследования миграции и концентрирования тория и урана, а также расчет форм их миграции при смене геохимических обстановок также будут информативны для понимания условий миграции близких по свойствам других радионуклидов, в том числе и техногенных.

На территории СИП помимо техногенных факторов (ядерные испытания и эксперименты с радиоактивными веществами) имеется ряд природных факторов повышенной радиоактивности. Регион относится к ураноносной провинции, а некоторые локальные места (например, долина ручья Карабулак) являются урановыми аномалиями [12, 13]. На фоне большого разнообразия гидрогеохимических обстановок (особенности рельефа, разгрузка подземных вод на поверхность, наличие горного массива, замкнутых водоемов различной глубины) поведение радионуклидов будет специфичным в каждом конкретном случае. На данной территории имеются природные воды самого различного состава – от пресных до соленых, богатые и бедные по растворенному органическому веществу, при этом концентрация урана и иногда тория выше фоновых значений.

Скорость переноса отдельных форм химических элементов может достигать значений, сопоставимых со скоростью движения природных вод [14]. Физико-химические механизмы переноса техногенных радионуклидов с водой недостаточно изучены. Это объясняется как методическими сложностями, так и объективной трудностью определения форм нахождения радионуклидов в водных системах из-за их низких и ультранизких количеств [15, 16].

На необходимость изучения форм нахождения радиоактивных элементов в системе раствор-коллоиды–взвешенное вещество указывают работы

[17, 18 и др.], ставшие уже классическими. В настоящее время происходит совершенствование аналитических методов, внедряются новые комбинированные инструменты для изучения фракционирования элементов, идентификации и определения геохимически и экологически значимых форм нахождения радионуклидов и ряда других значимых в экогеохимических исследованиях элементов в природных средах, что открывает совершенно новые возможности для улучшения прогностических моделей миграции вещества.

Обширный, но не исчерпывающий список методов изучения форм миграции урана, тория и других элементов в природных поверхностных водах приводится в обзоре S. Markich и P. Brown [19] и в [20]. Различные варианты физического фракционирования химических элементов с выделением частиц по размеру получили наиболее широкое распространение по сравнению с выделением химических форм.

Среди них можно отметить работы по каскадному фракционированию (ультрафильтрации) с использованием набора мембран, включая ультрафильтрацию [21, 22], по проточному и тангенциальному фракционированию, позволяющие осуществлять мультидетекторное сопряжение либо использовать большой объем пробы [23–27 и др.].

Помимо этого, для выделения «размерных» форм миграции радиоактивных элементов использовались также диализ, гель-фильтрация и размероисключающая хроматография, капиллярный электрофорез [19], в том числе сопряженные с масс-спектрометрическим детектированием элементов в каждой выделяемой фракции [19, 28] для количественного определения уранильных комплексов с естественным растворенным органическим веществом (РОВ) в пресной поверхностной воде, а также для разделения UO_2^{2+} и U^{4+} .

Как правило, ни один метод не дает однозначной и исчерпывающей информации о формах миграции металла. Обычно выгодно комбинировать два и более метода или использовать схему выделения форм нахождения [19]. Различные варианты комбинации методов представлены в работах [27–32 и др.].

Единого мнения о том, является ли какая-либо конкретная методика выделения форм нахождения элементов в воде оптимальной, на сегодняшний день нет. Работоспособность той или иной схемы фракционирования форм миграции каждый раз нужно верифицировать. А набор наиболее подходящих инструментов (схем выделения конкретных форм нахождения, методик, создание гибридных методов и т. п.) будет зависеть от природы и характера образца, набора определяемых элементов. Важно, чтобы форма существования металла (радионуклида) не изменялась после отбора проб, хранения, предварительной обработки или самим аналитическим методом (например, при нарушении равновесных условий). Как показал наш опыт и подчеркивают многие исследователи [10, 15, 19–21], определение форм нахождения элементов было и остается нетривиальной задачей. В силу методических сложностей эксперимен-

тальное выделение миграционных форм элементов вызывает высокие требования к профессионализму исполнителя и используемым аналитическим методам. Однако при отсутствии методологических ошибок даже сжатый набор методов может дать большое количество геохимической информации.

Химия и геохимия урана, как и многих других актиноидов, осложнена способностью данного элемента к изменению степени окисления. В гидрогеохимических системах миграция урана контролируется pH, окислительно-восстановительным потенциалом и рядом доступных комплексобразователей, таких как гуминовые вещества, карбонаты, фосфаты, сульфаты и т. д. [33].

Имеется и ряд неразрушающих методов, которые чаще всего могут дополнить общую картину понимания миграции радиоактивных элементов и ликвидировать «белые пятна» в вопросе форм нахождения и транспорта радионуклидов [34]. К таким методам относятся TRLFS и различные варианты спектроскопии рентгеновского поглощения (EXAFS, XANES) [35].

Большой вклад в понимание механизмов формирования различных форм миграции вносят и термодинамические методы расчета [36]. Чрезвычайное значение также имеет и достоверность термодинамических расчетов миграции радиоактивных элементов в условиях окружающей среды. Данные по константам равновесия урана достаточно обширны и детальны по сравнению с торием. Существует ряд термодинамических баз данных, например PRODATA (based on NEA-OECD TDB), Thermochimie, LLNL, Minteq, PSI/NAGRA и др., которые модифицируются или дополняются по мере необходимости, например, для уранилкарбонатов кальция и магния [37, 38]. Поскольку моделирование одного и того же состава воды с использованием различных баз данных может привести к весьма различным результатам [39], коррекция ионных сил растворов при моделировании и учет специфических комплексов являются критическими для расчетов [40].

Изучение миграции естественных радионуклидов – урана и тория – с методологической точки зрения имеет ряд преимуществ благодаря их широкой распространенности в природных водах и возможности определения как радиометрически, так и масс-спектрометрически, что позволяет более четко выявлять специфику влияния геохимических условий на особенности миграции и других элементов, в том числе сложно определяемых техногенных радионуклидов.

Объекты и методы исследования

Территория Семипалатинского испытательного полигона находится в северо-восточной части Казахстана, в восточной части Казахского мелкосопочника, в условиях засушливого резкоконтинентального климата.

Пробы отбирались на основных испытательных площадках СИП (рис. 1):

«Опытное поле», где проводились наземные ядерные испытания в 1949–1961 гг. Водные объекты этой площадки – это воронки после наземных ядерных испытаний, заполненные водой и заросшие водной растительностью, чаще всего камышом. Для детального

исследования взят один из таких водоемов – воронка В-1 (т. 1).

«Телькем» и «Балапан». Изучаемые водоемы представляют собой искусственные озера, образованные в результате экскавационных взрывов: Телькем-1 (т. 2) и Телькем-2 (т. 3); «Атомное» озеро (т. 4). Целью данных испытаний являлось создание искусственных водоемов в засушливом районе. «Атомное» озеро (другие названия озеро Чаган, Атомколь) сформировалось в результате заполнения водой воронки глубиной более 100 м и диаметром 400 м после взрыва в 1965 г. на месте слияния рек Шаган и Ащису (Ядерные испытания..., 1997; Semipalatinsk test..., 2017). Озера площадки «Телькем» образовались в 1968 г. в юго-восточной части СИП. Образованные воронки заполнились осадками и образовали одноименные озера «Телькем-1» с шириной 90 м и глубиной 15–20 м и «Телькем-2», вытянутое в форме овала озеро размерами 120×60 м и глубиной порядка 10–16 м [41 и др.].

Площадка «Дегелен», на одноименном горном массиве, где сосредоточено самое большое количество водных объектов. Горный массив Дегелен находится в южной части СИП. В геологическом отношении преобладающая часть горного массива сложена гранитами, которые распространены на три четверти территории. В горном массиве Дегелен выделяют трещинные воды палеозойских пород, поровые воды аллювиально-пролювиальных отложений, куда относятся и подрусловые воды. Юго-восточное направление подземных вод является основным и совпадает с направлением долины ручья Узынбулак. Трещинные воды образуют единый водоносный горизонт.

Исследованы самые крупные ручьи Узынбулак (т. 5) на месте выхода ручья за пределы площадки «Дегелен» и Карабулак с его притоками (т. 6–11). Общее количество проб, обсуждаемых в работе, составило 11.

В местах расположения испытательных площадок СИП проходят разломы глубокого залегания, которые определяют неоднородную фильтрационную способность пород. К основным разломам относят: Калба-Чингизский разлом на испытательной площадке «Опытное поле», Найманжальский разлом площадки «Телькем», и Чинрауский разлом площадки «Балапан». Зоны влияния тектонических разломов характеризуются более высокими показателями трещиноватости и наличием зон дробления. Это является неблагоприятным фактором для транспорта загрязненных радионуклидами вод в подземные воды территорий, где не имеется следов загрязнения.

Отбор проб природных вод проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85. Объем проб воды составлял 10–12 л. Пробу отбирали в чистые полиэтиленовые емкости, избегая попадания посторонних примесей. На месте отбора проводили фракционирование воды по размеру с фильтрованием через мембраны 450 нм и 10 кДа (соответствует размеру 3 нм). Таким образом, выделяли взвешенные формы (разница между нефилтрованной пробой и после фильтра 450 нм), коллоидные формы (разница между пробами, отфильтрованными через мембраны 450 нм и 10 кДа) и растворенные формы (<10 кДа).

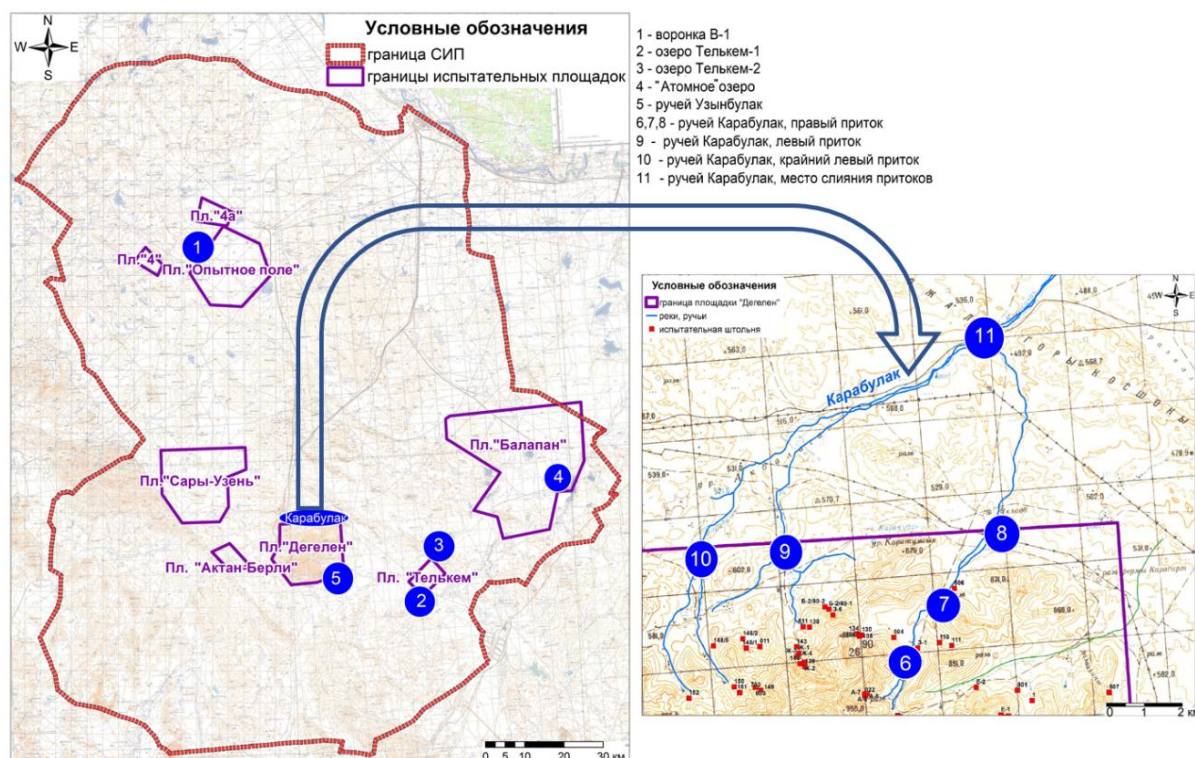


Рис. 1. Схема опробования водных объектов

Fig. 1. Scheme of water bodies sampling

Определение общей минерализации и pH и Eh воды выполняли с помощью анализатора жидкости лабораторного серии Анион 4100. Eh воды измерялся с хлор-серебряным электродом сравнения с последующим пересчетом на стандартный водородный электрод (SHE) при температуре 25 °С. Содержание основных ионов воды определяли методами титрования (HCO_3^- , CO_3^{2-}), Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , фотометрии (SO_4^{2-}), оптико-эмиссионной спектроскопии на приборах iCAP 6300 Duo и Optima8300DV (Na, K, Ca, Mg), а также ионной хроматографии на приборе Dionex-2000 (Cl^- , SO_4^{2-}). Общий органический углерод оценивался по перманганатной и бихроматной окисляемости (титрование и фотометрия соответственно). Для части образцов использовался метод каталитического сжигания на приборе Vario TOC cube, а также качественный метод – интенсивность UV сигнала (UV Shimadzu 1800) в диапазоне от 225 до 280 нм. Содержание U и Th определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) на приборах Elan-9000, Agilent 7600, Thermo Element XR в соответствии со стандартом ИСО 17294-2-2006.

Моделирование миграционных форм урана и тория проводилось с помощью программного комплекса Visual Minteq 3.1. Использовалась встроенная база данных констант равновесия. Расчет проводился при температуре 25 °С, давлении 1 атм и равновесном с атмосферой парциальном давлении углекислого газа. Модель была ограничена следующими компонентами: pH, Eh, общая щелочность ($(\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$), Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Si (H_4SiO_4), Fe^{3+} , UO_2^{2+} , Th^{4+} , растворенный органический углерод ($\text{C}_{\text{орг}}$). Расчет органических форм миграции элементов проводили с по-

мощью модели NICA-Donnan с отдельным введением концентраций гуминовых (ГК) и фульвокислот (ФК). Отношение активного (способного к биотрансформации) $\text{C}_{\text{орг}}$ к органическому углероду принимали как 1,65, долю ФК учитывали исходя из соотношения ГК/ФК. Ионная сила раствора и баланс анионов и катионов рассчитывались автоматически. Коррекция активности ионов проводилась по уравнению Дэвиса с b-параметром равным 0,3.

Результаты и их обсуждение

Изученные водные объекты СИП представляют собой водоемы и ручьи, которые существенно различаются по условиям миграции радионуклидов.

По химическому составу и преобладающим ионам воды горного массива Дегелен относятся к пресным водам сульфатного, кальциевого и гидрокарбонатно-сульфатного кальциевого состава. По данным [42–44] химический состав вод стабильный и не зависит от сезона. Перемещаясь по системам трещин и полостям штолен, воды пополняют бассейн подземных вод либо выходят на дневную поверхность в районе порталов штолен.

Изученные воды существенно различались по химическому составу, хотя и прослеживались схожие условия их формирования. Изучаемая территория характеризуется широким набором условий формирования поверхностных вод и достаточно пестрой геохимической обстановкой. На формирование химического состава природных вод СИП оказывают влияние механизмы испарительного концентрирования и континентального засоления, выщелачивания водовмещающих пород в условиях повышенной трещи-

новатости и образования большого количества зон дробления в результате деформации горного массива Дегелен вследствие ядерных испытаний.

Как уже было сказано ранее, водоисточники представлены техногенными озерами и воронками, а также ручьями и реками.

Таблица 1. Химический состав природных вод Семипалатинского испытательного полигона, среднее содержание (минимум–максимум)

Table 1. Chemical composition of natural waters of Semipalatinsk Test Site (STS), mean (minimum–maximum)

Показатель, ед. изм. Parameter, units	Ручьи/Riverstreams (n=7)	Озера/Lakes (n=4)
pH	7,44 (7,14–7,91)	7,92 (7,20–8,36)
Eh _{ШЕ} , мВ/mV	249 (208–260)	186 (152–207)
C _{орг} , мг/л/Dissolved organic carbon, mg/l*	12,8 (9,6–16)	14 (5–35)
ФК/ТК/ФА/НА (humic acid/fulvic acid)	9,5	7
Минерализация, мг/л TDS, mg/l	472 (235–2310)	10950 (1960–20520)
HCO ₃ ⁻ , мг/л/mg/l	171 (67–490)	332,5 (180–530)
SO ₄ ²⁻ , мг/л/mg/l	221 (79–1100)	3345 (600–7580)
Cl ⁻ , мг/л/mg/l	15 (5,5–210)	3705 (420–5950)
Ca ²⁺ , мг/л/mg/l	93 (54–120)	380 (120–540)
Mg ²⁺ , мг/л/mg/l	18,5 (8–76)	512 (80–910)
Na ⁺ +K ⁺ , мг/л/mg/l	39,5 (17–560)	2845 (480–5450)
Si, мг/л/mg/l	6 (4,5–10)	3 (2,2–3,8)
Fe, мкг/л/μg/l	210 (180–240)	330 (90–600)
Ca ²⁺ /Mg ²⁺	5,0 (1,6–8,4)	0,92 (0,59–1,50)
SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻	16,4 (5,2–53,3)	0,97 (0,47–1,43)

n – количество проб/n – number of samples; *Для водоемов Телькем-1 и Телькем-2 при расчете среднего содержания C_{орг} использовалось значение половины предела обнаружения/*For Telkem-1 and Telkem-2 lakes the half of the detection limit was used for mean value of DOC.

По значениям pH (табл. 1) воды большинства опробованных ручьев и воронки В-1 были нейтральными, воды объектов Телькем-1, Телькем-2 и «Атомного» озера – слабощелочными. Значения Eh (приведенный к стандартному потенциалу и 25 °С) природных вод СИП укладываются в диапазон +150...+260 мВ, выстраиваясь в ряд в зависимости от pH на 600–700 мВ выше нижней границы предела устойчивости воды и на 200–300 мВ ниже равновесия взаимодействия воды с атмосферой [45]. Для всех водных объектов характерна переменная окислительно-восстановительная обстановка.

Вода водоемов В-1 и Телькем 2 относится к солоноватым водам (1960 и 8950 мг/л соответственно). Воды озера Телькем-1 (20520 мг/л), «Атомного» озера (12380 мг/л) – к соленым водам. Воды ручьев были пресными, за исключением места слияния притоков ручья Карабулак, где вода была солоноватой.

По ионному составу поверхностные воды СИП достаточно разнообразны. Основные геохимические фации были выделены по преобладающим анионам и катионам с помощью диаграммы Пайпера (рис. 2). При этом четкая дифференциация наблюдается между водоемами и ручьями. Рост минерализации штольневых вод обеспечивается увеличением содержания в

них гидрокарбонат-иона, кальция, магния, а также сульфат-ионов.

Воды ручьев имеют близкий состав со штольневыми водотоками, поскольку последние подпитывают их [10]. Воды ручьев Узынбулак и Карабулак по составу сульфатные кальциевые. Отношение SO₄²⁻/Cl⁻ в ручьях изменяется в пределах от 5,2 до 53. Это позволяет предположить, что состав вод ручьев формируется под влиянием процессов выщелачивания минералов водовмещающих пород и окисления сульфидных минералов. На диаграмме Пайпера (рис. 2) во всех плоскостях точки ручьев лежат очень близко друг к другу и при этом занимают промежуточное положение по отношению к составу штольневых вод. Таким образом, при смешивании вод мелких ручьев и родников, подпитывающих ручьи массива Дегелен, происходит «выравнивание» их химического состава. Это можно принимать во внимание при оценке миграции радиоактивных элементов вниз по течению ручьев.

Поверхностные водоемы находятся в зоне влияния континентального засоления с изменением отношения SO₄²⁻/Cl⁻=1,4 в водах водоема В-1, озера Телькем-1 – 1,2, «Атомного» озера – 0,7, озера Телькем-2 – 0,5. Воды водоемов по составу являются хлоридными и хлоридно-сульфатными. Преобладающие анионы, а также натрий пропорционально увеличиваются с ростом минерализации в водоемах, отношение Ca²⁺/Mg²⁺ также снижается.

Содержание органического углерода в ручьях варьировало от 10 до 16 мг/л, в водоемах достигало 35 мг/л (Воронка В-1). Для части проб не было получено количественных значений из-за низкой чувствительности методов определения органического вещества в пробах со сложной матрицей и высокой минерализацией. Однако в водах, где содержание растворенного органического углерода было ниже предела обнаружения, в частности для озера Телькем-2, гуминовые и фульвокислоты фиксировались качественно по поглощению УФ-спектра.

Обращаясь к ранее проведенным исследованиям, необходимо отметить, что водный режим и характер питания также могут оказать влияние на миграцию радиоактивных элементов и распределение форм их нахождения. Отношение стабильных изотопов ²H/¹⁸O свидетельствует о питании водоема за счет атмосферных осадков [10, 11], поскольку воды озера Телькем-2 и водоема В-1 лежат очень близко к локальной линии метеорных вод. Небольшие сдвиги изотопного состава в местах отбора проб могут объясняться конденсированием испаренной влаги с водного зеркала озера в поверхностном слое [46]. Такие данные не противоречат выводам авторов, исследовавших «Атомное» озеро [47 и др.], о том, что основной источник поступления радионуклидов в водоем – выщелачивание из загрязненного грунта. Это позволяет распространить такое суждение и на другие водоемы Семипалатинского полигона.

Также ранее установлено [11], что штольневые воды, подпитывающие ручьи горного массива Дегелен, по отношению ²H/¹⁸O утяжелены по дейтерию в сравнении с локальной линии метеорных вод. Такое рас-

пределение можно объяснить испарительным концентрированием инфильтрационных вод метеогенного формирования. Также возможно существование дополнительного источника питания вод в условиях относительной литологической и гидрогеологической закрытости, с отличным от линии метеорных вод от-

ношением $^2\text{H}/^{18}\text{O}$. Левосторонний сдвиг $\Delta^2\text{H}$ относительно линии метеорных вод можно также объяснить и активным истощением ^{18}O вследствие его перехода в карбонатные отложения и углекислоту, а также отставанием вовлечения дейтерия во вторичные минералы в процессе взаимодействия вода–порода [48].

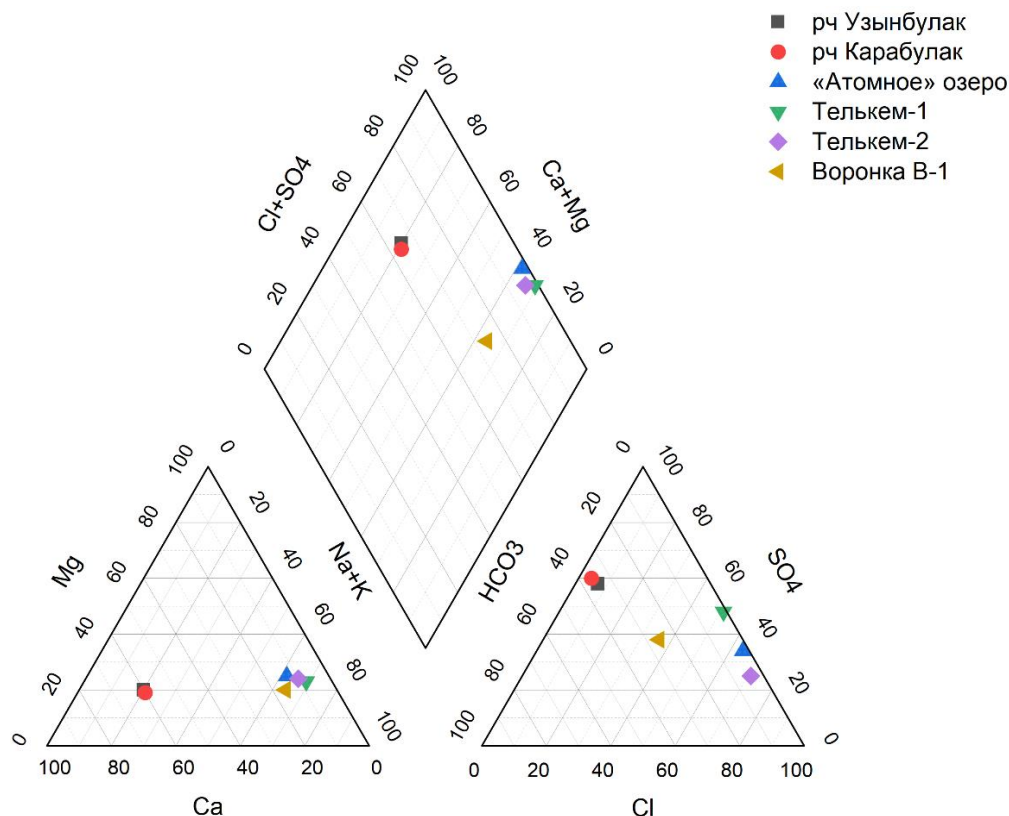


Рис. 2. Пайпер-диаграмма химического состава озер и ручьев СИП

Fig. 2. Piper diagram of chemical composition of lakes and waterstreams of STS

Таблица 2. Распределение радионуклидов в водных объектах СИП и формы их нахождения, среднее значение (минимум–максимум)

Table 2. Distribution of radionuclides and their speciation in water bodies of STS, mean (minimum–maximum)

Показатель, ед.изм. Parameter, units	Ручьи/Riverstreams (n=7)	Озера/Lakes (n=4)
$\text{Th}_{\text{вал}}/\text{Th}_{\text{total}}$, мкг/л/μg/l	0,43 (0,11–0,59)	19,1 (4,5–46)
$\text{Th}_{\text{взвеш}}/\text{Th}_{\text{susp}}$, %	89 (84–92)	88,4 (75,4–94,4)
$\text{Th}_{\text{колл}}/\text{Th}_{\text{coll}}$, %	9,2 (7,6–11,4)	11,1 (5,3–24,4)
$\text{Th}_{\text{раств}}/\text{Th}_{\text{diss}}$, %	1,5 (0,8–2,4)	0,42 (0,1–0,9)
$\text{U}_{\text{вал}}/\text{U}_{\text{total}}$, мкг/л/μg/l	110 (32–810)	202 (10,6–2567)
$\text{U}_{\text{взвеш}}/\text{U}_{\text{susp}}$, %	55 (47–82)	84,5 (49–98)
$\text{U}_{\text{колл}}/\text{U}_{\text{coll}}$, %	13 (5–15)	3,6 (0,5–12)
$\text{U}_{\text{раств}}/\text{U}_{\text{diss}}$, %	32(10–42)	12 (2–39)

Примечание: серым цветом выделены строки с формами нахождения радионуклидов.

Note: speciation of radionuclides is highlighted gray.

Валовое содержание тория (табл. 2) в природных водах СИП изменяется в широких пределах, более двух порядков – от 0,11 до 46 мкг/л. При этом, если отсечь взвешенную фракцию (крупнее 450 нм), сумма

оставшихся фракций, которая наиболее часто рассматривается в исследованиях по гидрогеохимии радиоактивных элементов как растворенная форма, составит от 0,014 до 3,7 мкг/л соответственно. Видно, что доминирует взвешенная форма в переносе тория и урана. При этом доля переносимого со взвесями тория примерно одинаковая как для ручьев, так и для озер. В то время как для урана отмечена существенная разница. В ручьях гораздо большая доля урана мигрирует в форме растворенных частиц, проходящих через мембрану 10 кДа. Доля урана, мигрирующего в водах ручьев с частицами коллоидной размерности, примерно в три раза выше, чем в водоемах.

Содержание урана в изучаемых природных водах аналогично изменяется в диапазоне двух порядков. При этом концентрация данного радиоактивного элемента (<450 нм) в водоемах меньше: от 5,5 мкг/л (В-1) до 66 мкг/л (Телькем-2). В ручьях горного массива Дегелен общее содержание урана составляет 60 и 81 мкг/л для ручьев Карабулак и Узынбулак соответственно.

Доля мигрирующего в коллоидной форме урана в водотоках массива Дегелен невысока, от 5 до 15 %. Однако, учитывая высокие концентрации этого ра-

диоактивного элемента и особенности миграции элементов в коллоидных формах, это может свидетельствовать о значимом выносе урана с коллоидами. В водоеме В-1 и ручье Карабулак доля урана, который мигрирует в коллоидной форме, выше, что может объясняться более высоким содержанием органического вещества, замедленным водообменом и высокой концентрацией коллоидов.

Для тория также было установлено преобладание взвешенной формы (от 75 до 91 % от суммы всех форм нахождения). В среднем порядка 12 % тория переносится в изученных водоисточниках с коллоидами, с максимумом для водоема В-1 (24 %).

Для ручья Карабулак преобладает взвешенная форма урана и тория. Было подробно изучено изменение форм нахождения в пространстве (рис. 3). Ближе к истокам ручьев горного массива происходит разгрузка подземных вод, обогащенных радионуклидами. Несомненно, в этих водотоках присутствуют и техногенные радионуклиды, что было показано нами в более ранних работах. Однако в связи со значительной деформацией массива и увеличением проницаемости пород скорость выщелачивания природных радионуклидов могла существенно увеличиться, а миграция – ускориться.

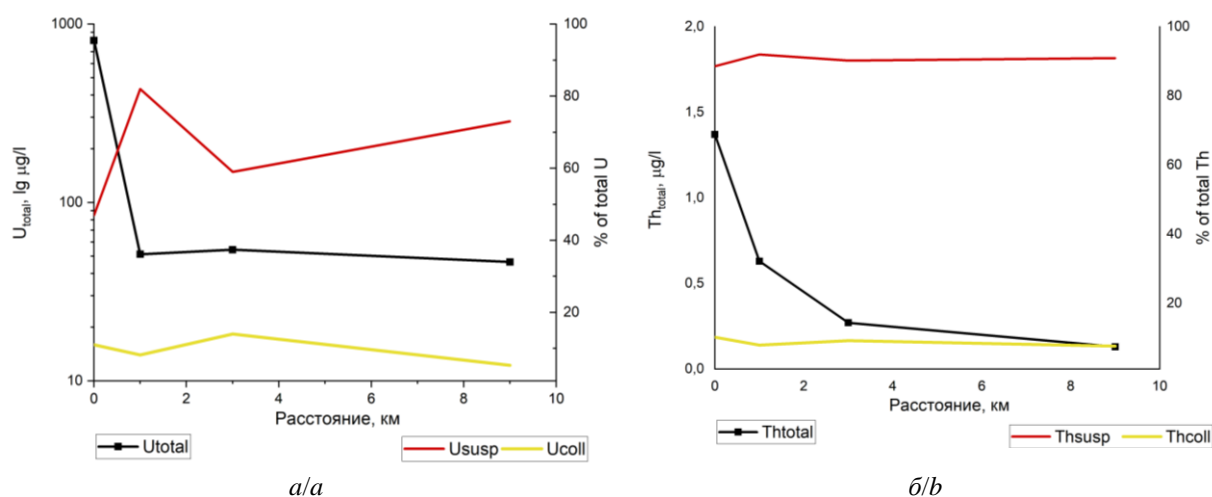


Рис. 3. Распределение тория, урана и долей коллоидной и взвешенной фракций в правом притоке ручья Карабулак от истока до места слияния притоков: а) распределение валового содержания и доли форм нахождения U; б) распределение валового содержания и долей форм нахождения Th. Красной и желтой линией выделены доли форм нахождения урана и тория в виде взвесей и коллоидов соответственно, черной линией – общее содержание элементов

Fig. 3. Distribution of thorium, uranium and the proportions of colloidal and suspended fractions in the right tributary of the Karabulak riverstream from the headspring to the confluence of the tributaries: а) distribution of the total content and the proportion of U species; б) distribution of the total content and the proportion of Th species. The red and yellow lines show the proportions of the uranium and thorium in suspended and colloidal fractions respectively, the black line is the total content of elements

Одной из задач исследования стояло изучение трансформации миграционных форм радионуклидов вниз по течению от источников их поступления. Наиболее показательным для таких наблюдений был участок правого притока ручья Карабулак, где существует подток вод с повышенным содержанием урана (более 800 мкг/л урана и 3 мкг/л тория, по собственным исследованиям). Протяженность участка составила порядка 9 км. Расстояние между первыми тремя точками – 1,5 км, крайняя точка находится в 9 км от первой. В целом соотношение форм нахождения кардинально не меняется от точки к точке отбора, но уменьшается общее содержание радиоактивных элементов. Максимальное содержание урана и тория приурочено к истоку ручья (точка 6, рис. 1), где имеются источники поступления этих радионуклидов со штольневными водами. Ниже по течению ручья, при достижении точки 11 (место слияния притоков), содержание урана падает примерно на порядок, а содержание тория – в 3–6 раз. Таким образом, Th/U от-

ношение по сумме форм нахождения повышается к месту слияния притоков ручья Карабулак. Возрастает роль коллоидов в переносе радиоактивных элементов на фоне снижения общего их содержания.

Наблюдая за распределением форм нахождения этих двух элементов, отмечено, что формы урана более чувствительны к изменению ландшафтно-геохимических условий среды, чем тория. Так, в пределах 3 км доля коллоидной формы урана изменялась почти в два раза – от 8,2 до 14 %, в то время как ионный состав и минерализация вод ручья были примерно одинаковыми. Вероятно, на данном участке происходит перераспределение форм нахождения, обратимая сорбция взвесями ручья и захват урана коллоидными частицами. Далее на фоне повышения солесодержания (от 450 до 2300 мг/л) в месте слияния притоков ручья Карабулак из-за механизма испарительного концентрирования и снижения интенсивности водообмена доля коллоидного урана сокращается в 3 раза. В то же время доля коллоидной и взвешенной фракций тория

(рис. 3, б) остается на одном уровне несмотря на то, что его концентрация снижается на порядок.

Соотношение отдельных элементов – часто применяемый параметр, который может быть четким индикатором геохимических процессов и интенсивности миграции элементов. Иногда такие параметры более информативны, чем валовое содержание элементов в отдельности. Так, известный в геохимии радиоактивных элементов параметр, отношение Th к U [49], преимущественно используется в геохимии минералов и горных пород, а также их датировке. И теоретическое рассчитанное, и экспериментально установленное отношение Th/U в земной коре на сегодняшний день укладывается в диапазон 3–4 [50], с весьма широким диапазоном в горных породах разного состава. Однако в водах гидросферы в подавляющем большинстве экспериментальных исследований [50, 51] значение много меньше единицы ($\text{Th}/\text{U}=10^{-3}\text{--}10^{-5}$), однако встречаются в исключительных случаях воды с Th/U выше единицы и более. Величина этого показателя для океанических вод, доля которых составляет 98 % вод гидросферы, в среднем равна 0,0036 [49–51]. Для крупнейшего по запасам пресной воды озера Байкал данная величина в среднем составляет 0,007 [49].

В исследованных водных объектах Th/U составило: для ручьев 0,0011, для водоемов почти в три раза выше – 0,0028. Это можно объяснить замедленным водообменом в водоемах, где создаются благоприятные условия для перехода тория в коллоидное состояние, либо, напротив, более активное осаждение урана со вторичными минералами, достигшими насыщения в солоноватой воде озер и выпадающими в осадок. В воде водоемов Th/U выше почти на порядок, вероятно,

за счет более медленного водообмена и обогащения воды торием в процессе выщелачивания из горных пород.

Другой задачей работы был расчет доминирующих форм миграции природных радионуклидов в растворенной форме. Поскольку применение экспериментальных методов выделения форм миграции на сегодняшний день затруднительно для тех количеств радионуклидов, которые присутствуют в природных водах, успешно применяются расчетные методы на основе известных термодинамических констант, произведений растворимости отдельных компонентов и наличия комплексообразующих веществ. По термодинамическим расчетам, преобладающей формой миграции урана в водах данного состава, в диапазоне экспериментальных значений pH и Eh, будут уранил-карбонатные комплексы (LNLL, OECD-NEA). Для тория расчеты показывают наиболее вероятную форму его нахождения при построении pH–Eh диаграмм ThO_2cr , торианит (LNLL, JNC-TDB). Однако это утверждение будет справедливо для растворенных форм нахождения при отсутствии комплексообразователей. Наличие в воде комплексообразователей, растворенных органических веществ и коллоидов различной размерности искажает идеальную картину, получаемую при применении таких расчетов и моделирования по существующим константам равновесия. Даже более детальный расчет с учетом содержания основных ионов воды и органических веществ, приведенный на рис. 4, 5, который демонстрирует возможность миграции урана в виде уранилкарбоната кальция, а также обоих элементов в виде фульво- и гуматных комплексов, не учитывает в полной мере геохимического облика всех водных систем.

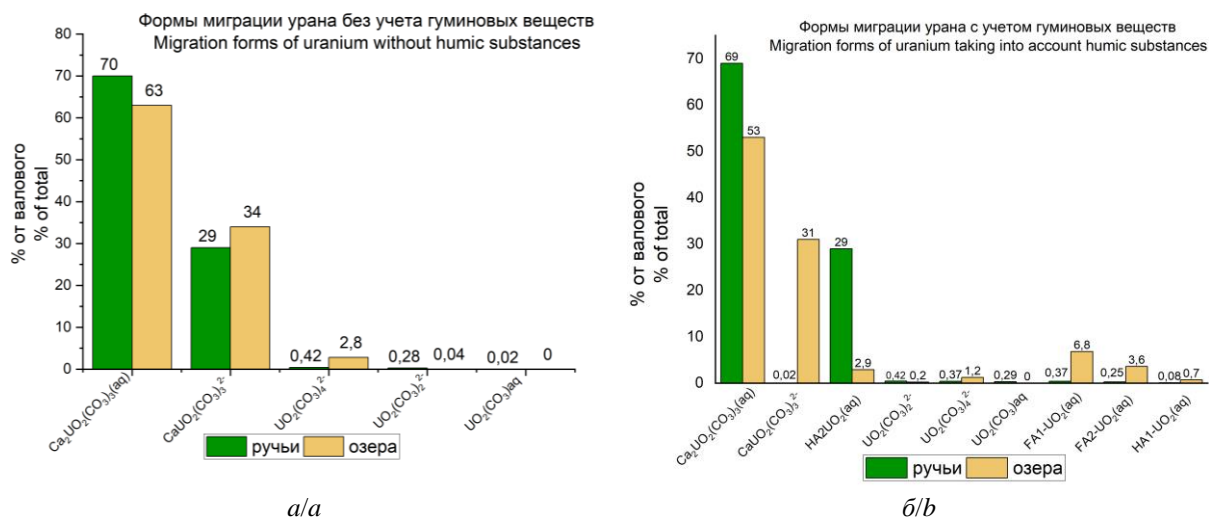


Рис. 4. Формы миграции урана в ручьях и озерах СИП: а) без учета в модели комплексообразующих веществ; б) с учетом влияния гуминовых веществ. Примечание для рис. 4, 5: HA1, FA1 соответствуют карбоксильным типам соединения с гуминовыми кислотами и фульвокислотами, HA2, FA2 – фенольным функциональным группам связи металл-лиганд для этих соединений

Fig. 4. Migration forms of uranium in riverstreams and lakes of STS: a) without taking into account humic substances in modelling; b) taking into account humic substances. Note for Fig. 4, 5: HA1, FA1 correspond to carboxyl types of compounds with humic acids and fulvic acids, HA2, FA2 – phenolic functional groups of metal-ligand bonds for these compounds

Рассчитаны формы миграции урана (рис. 4) и тория (рис. 5) в природных водах с помощью программы Minteq Visual 3.1. База данных этого программного комплекса регулярно дополняются и обновляются. Поскольку состав водоемов и водотоков существенно отличался, было решено рассмотреть их по отдельности. Выделены формы нахождения тория и урана с учетом и без учета гуминовых веществ для того, чтобы была возможность сравнить, насколько может изменяться картина в присутствии комплексообразующих веществ. В модель были заложены все компоненты, перечисленные в табл. 1. Отдельно моделировались формы миграции с учетом гуминовых веществ и без них.

Программный комплекс также позволяет рассчитывать индексы насыщения по основным породообразующим минералам и специфичным в этом исследовании минералам урана и тория. Эти данные могут быть использованы для интерпретации данных при изучении процессов осаждения радиоактивных элементов с теми или иными фазами.

При расчете форм миграции урана было установлено, что уранилкарбонат кальция будет преобладать, вне зависимости от состава воды и учета гуминовых веществ. Преобладание именно такой формы миграции в природных водах было экспериментально подтверждено и неразрушающим методом рентгеновской спектроскопии поглощения ранее в работе Г. Бернарда с соавторами [52].

При добавлении в модель гуминовых веществ доминантная форма миграции остается неизменной. Однако для маломинерализованных вод ручьев появляется существенная доля миграционной формы урана, связанной с фенольными функциональными группами гуминовых кислот. При этом, согласно расчетам, среди органических форм для ручьев существенную роль будут играть гуматные комплексы (до 30 % от суммы форм миграции), а в водоемах – фульватные. В целом по результатам моделирования видно, что роль гуминовых веществ в водоемах ниже, чем в водах ручьев. Это может быть связано с тем, что в водах с более высокой ионной силой устойчивость неорганических комплексов выше.

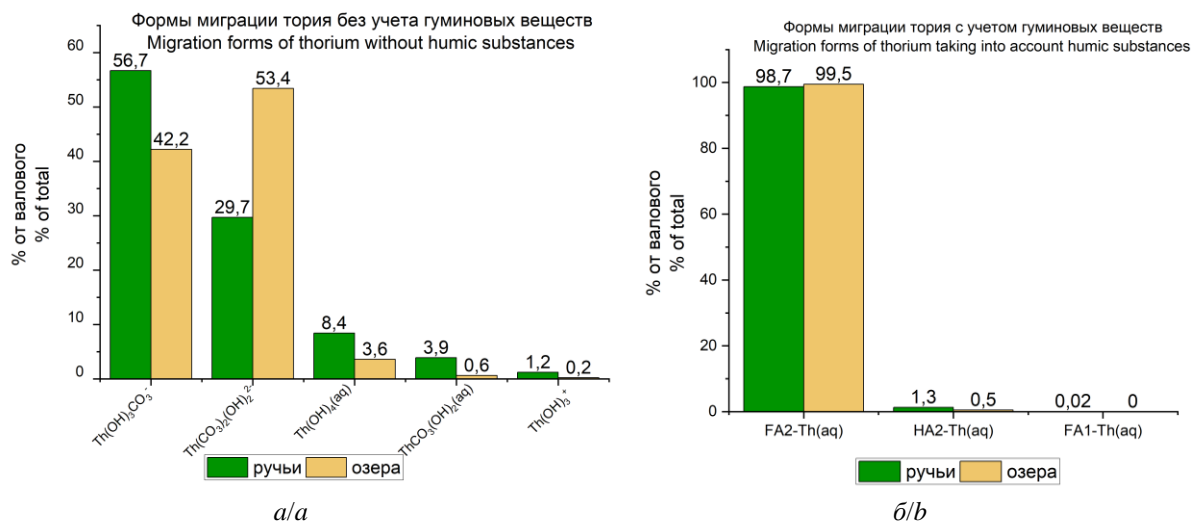


Рис. 5. Формы миграции тория в ручьях и озерах СИП: а) без учета в модели гуминовых веществ; б) с учетом влияния гуминовых веществ

Fig. 5. Migration forms of thorium in riverstreams and lakes of STS: a) without taking into account humic substances in modelling; b) taking into account humic substances

При добавлении в модельную систему для расчетов гуминовых веществ для тория картина распределения его форм миграции существенно меняется. Так, весь торий связывается фенольными функциональными группами фульвокислот. Лишь небольшая его часть взаимодействует с аналогичными группами гуминовых кислот. Выведение тория с коллоидами и взвесями также может быть следствием его выведения с ассоциатами высокомолекулярных органических веществ либо органоминеральными коллоидами, где одним из компонентов являются фульвокислоты. Поскольку в природных водах практически всегда присутствуют органические вещества гуминовой природы, при детальном рассмотрении особенностей миграции тория, с одной стороны, можно было бы пренебречь его неорганическими комплексами. Од-

нако необходимо учитывать ограниченность модели только железом. Данный элемент был включен в модель как элемент, имеющий самые высокие константы устойчивости среди большинства изученных металлов. Однако в присутствии элементов, имеющих более высокие или сопоставимые константы устойчивости с фульво- и гуминовыми кислотами для тория, например меди, кобальта и др., вся доступная для комплексообразования органическая составляющая будет расходоваться. И в таком случае миграция тория, равно как и урана, будет определяться неорганическими комплексами, которые и были рассмотрены в работе.

Опираясь на суждения авторов [36 и др.], мы выделили градацию по индексу насыщения $0 \leq SI \leq -0,3$ как равновесную либо близкую к равновесию. Таким

образом, пресные гидрокарбонатные нейтральные воды ручьев площадки «Дегелен» по величине SI (табл. 3) были насыщены только относительно кварца и близки к насыщению кальцитом (равновесны).

Таблица 3. Индексы насыщения (SI) основных минералов в водных объектах СИП

Table 3. Saturation indexes (SI) for main mineral phases in water bodies of STS

Основные минералы, достигшие насыщения Main minerals at saturation point and above (SI>0) либо близкие к равновесию or near equilibrium (0,3≥SI≥-0,3)	Ручьи Waterstreams	Озера/Lakes
	Кварц Quartz (0,4) Кальцит Calcite (-0,08)	Торианит/Thorianite (4,9) Каолинит/Kaolinite (3,3) Доломит/Dolomite (1,9) Арагонит/Aragonite (0,75) Кальцит/Calcite (0,89) Кварц/Quartz (0,04) Гипс/Gypsum (-0,27) минералы группы железа и др. iron minerals etc.

Воды водоемов, состав которых использовался для расчетов в модели, будут насыщены по карбонатам кальция и магния, минералам группы железа и отдельным алюмосиликатам. По отношению к гипсу и кварцу воды можно считать равновесными. Формирование торианита, несмотря на высокий индекс насыщения, остается дискуссионным ввиду крайне малого его количества. Возможно, наличие других акцессорных фаз будет инициировать развитие его нестехиометрических соединений.

Таким образом, при высаживании перечисленных вторичных минералов для водоемов будет очевиден более активный вынос естественных радионуклидов при их соосаждении и сорбции на данных фазах.

Заключение

Полученные результаты в совокупности позволяют более объективно взглянуть на особенности переноса в водной среде природных радиоактивных элементов и обозначить процессы, которые в значительной степени его определяют. Сульфат-ион в водах ручьев является индикатором интенсивности водообмена и скорости

окисления сульфидных минералов, в результате чего высвобождаются в раствор значительные концентрации урана. Размеры и форма ореола рассеяния урана будут определяться наличием геохимических барьеров на пути водных потоков, ограничиваясь при росте минерализации и распространяясь при увеличении концентрации гуминовых веществ в воде.

Уран как более сильный мигрант в условиях поверхностных вод преимущественно связан с органическими и органоминеральными комплексами, а также в большей степени подвержен трансформации форм нахождения в случае изменения геохимических условий среды. Для обоих элементов характерна миграция в виде коллоидных частиц. При этом для тория коллоидный транспорт более выражен.

Доминирующей миграционной формой как тория, так и урана являются взвешенные компоненты природных вод, которые определяют более 50 % от суммы всех форм нахождения. На расстоянии 9 км от источника поступления в воду радионуклидов, в долине ручья Карабулак, общее содержание урана падало более чем на порядок, а тория – в 3–6 раз. При этом Th/U в растворенной форме остается более стабильным на данном участке, по сравнению с коллоидными и взвешенными формами. Повышенные отношения Th/U во взвешенной форме отражают происхождение тория в этой фракции – выветривание горных пород. Более низкие отношения этих элементов для растворенной формы показывают способность урана проявлять высокое сродство к комплексообразованию и миграции с растворенным органическим веществом – гуминовыми и фульвокислотами. При сопоставлении Th/U в коллоидной форме для вод с разным гидродинамическим режимом прослеживается и степень влияния терригенной составляющей. В воде водоемов Th/U выше почти на порядок, вероятно, за счет более медленного водообмена и обогащения воды торием в процессе выщелачивания из горных пород.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-33-60030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Medved I., Černý R. Modeling of radionuclide transport in porous media: a review of recent studies // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – V. 526. – 151765.
- Regional geochemical survey of concealed sandstone-type uranium deposits using fine-grained soil and groundwater in the Erlan basin, north-east China / B. Zhang, X. Wang, J. Zhou, Z. Han, Q. Liu, W. Wang, R. Li, B. Zhang, B. Dou // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 216. – 106573. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2020.106573> (дата обращения 15.09.2020).
- Uranium in the environment. Mining impact and consequences / Eds. B. Merkel, A. Hasche-Berger. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. – 896 p.
- Uranium aqueous speciation in the vicinity of the former uranium mining sites using the diffusive gradients in thin films and ultrafiltration techniques / J. Drozdak, M. Leermakers, Y. Gao, M. Elskens, V. Phrommavanh, M. Descostes // Analytica Chimica Acta. – 2016. – V. 913. – P. 94–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.01.052> (дата обращения 15.09.2020).
- Radiological and pollution risk assessments of terrestrial radionuclides and heavy metals in a mineralized zone of the siwalik region (India) / P. Pandit, P. Mangala, A. Saini, P. Bangotra, V. Kumar, R. Mehra, D. Ghosh // Chemosphere. – 2020. – V. 254. – 126857. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126857> (дата обращения 15.09.2020).
- Weathering and evaporation controls on dissolved uranium concentrations in groundwater – a case study from northern Burundi / V.E.A. Post, S.I. Vassolo, C. Tiberghien, D. Baranyikwa, D. Miburo // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 607–608. – P. 281–293. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.006> (дата обращения 15.09.2020).
- Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq // Environmental Earth Sciences. – 2016. – V. 75. – № 10. – P. 1–13. URL: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5685-3> (дата обращения 15.09.2020).
- Uranium isotope composition of waters from South Texas uranium ore deposits / C.J. Placzek, J.M. Heikoop, B. House, B.S. Linhoff, M. Pelizza // Chemical Geology. – 2016. – V. 437. – P. 44–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.008> (дата обращения 15.09.2020).

9. Co-transport of U(VI) and gibbsite colloid in saturated granite particle column: role of pH, U(VI) concentration and humic acid / J. Yang, Z. Zhang, Z. Chen, M. Ge, W. Wu, Z. Guo // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 688. – P. 450–461. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.395> (дата обращения 15.09.2020).
10. Tоропов А.С. Migration forms of anthropogenic radionuclides in tunnel waters at the Degelen Mountains, Semipalatinsk Test Site // *Geochemistry International*. – 2020. – V. 58. – № 3. – P. 342–351.
11. Торопов А.С. Фракционирование форм нахождения техногенных радионуклидов в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 6. – С. 74–84.
12. Каюков П.Г. Изучение радиационной обстановки на территории Республики Казахстан. Отчет за 2004–2008 гг. – Алматы: Волковогеология, 2008. – Т. 2. Восточно-Казахстанская область. – 177 с.
13. Comparative analysis of water contamination of the Shagan river at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides / I. Gorchachev, P. Kharkin, M. Dyussebayeva, S. Lukashenko, G. Gluchshenko, L. Matiyenko, D. Zheltov, A. Kitamura, N. Khlebnikov // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 213. – P. 06110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106110> (дата обращения 15.09.2020).
14. Мальковский В.И., Юдинцев Р.В. Модель коллоидного переноса радионуклидов подземными водами // *Доклады Академии наук*. – 2016. – Т. 470. – № 1. – С. 87–90. URL: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16090051> (дата обращения 15.09.2020).
15. Ure A.M., Davidson C.M. Chemical speciation in the environment. – Glasgow: Blackwell Science, 2002. – 452 p.
16. Radioactive particles in the environment: sources, particle characterization and analytical techniques. IAEA-TECDOC-1663. – Vienna: International Atomic Energy agency, 2011. – 90 p.
17. McCarthy J.F., Zachara J.M. Subsurface transport of contaminants // *Environmental Science Technology*. – 1989. – V. 23. – P. 496–502.
18. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site / A.B. Kersting, D.W. Efrud, D.L. Finnegan, D.J. Rokop, D.K. Smith, J.L. Thompson // *Nature*. – 1999. – V. 397 (6714). – P. 56–59.
19. Markich S.J., Brown P.L. Actinide speciation and bioavailability in fresh and marine waters // *The heaviest metals: science and technology of the actinides and beyond* / Eds. W.J. Evans, T.P. Hanusa. – USA: Wiley, 2018. – P. 367–400. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2559> (дата обращения 15.09.2020).
20. Environmental colloids and particles: behavior, separation and characterization / Eds. K.J. Wilkinson, J.R. Lead. – England: Wiley, 2007. – 502 p.
21. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–mire–humic lake–river–large oligotrophic lake of a Subarctic watershed / S.M. Ilina, S.A. Lapitskiy, Y.V. Alekhin, J. Viers, M. Benedetti, O.S. Pokrovsky // *Aquatic Geochemistry*. – 2016. – V. 22. – P. 65–95.
22. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects // *Geochemistry International*. – 2010. – V. 48. – № 13. – P. 1263–1387.
23. Trace element speciation in natural waters using hollow-fiber ultrafiltration / E. Lydersen, H.E. Bjornstad, B. Salbu, A.C. Pappas // *Speciation of metals in water, sediment and soil systems* / Ed. by L. Landner. – Berlin; Heidelberg: Springer, 1987. – V. 11. – P. 85–97.
24. Transport of low 240Pu/239Pu atom ratio plutonium-species in the Ob and Yenisey Rivers to the Kara Sea / O.C. Lind, D.H. Oughton, B. Salbu, L. Skipperud, M.A. Sickel, J.E. Brown // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2006. – V. 251. – № 1–2. – P. 33–43.
25. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment / B. Salbu, V. Kashparov, O.C. Lind, R. Garcia-Tenorio, M.P. Johansen, D.P. Child, R.C. Sanchof // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2018. – V. 186. – P. 101–115.
26. Bouby M., Finck N., Geckeis H. Flow field-flow fractionation (FIFFF) coupled to sensitive detection techniques: a way to examine radionuclide interactions with nanoparticles // *Mineralogical Magazine*. – 2012. – V. 76. – № 7. – P. 2709–2721.
27. Suspended particulate matter determines physical speciation of Fe, Mn, and trace metals in surface waters of Loire watershed / M. Baalousha, S. Stoll, M. Motelica-Heino, N. Guigues, G. Braibant, F. Huneau, P. le Coustumer // *Environmental Science Pollution Research*. – 2019. – V. 26. – № 6. – P. 5251–5266. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1416-5> (дата обращения 15.09.2020).
28. Speciation of trace metals in pond water as studied by liquid chromatography/inductively coupled plasma mass spectrometry / A. Itoh, C. Kimata, H. Miwa, H. Sawatari, H. Haraguchi // *Bulletin of Chemical Society of Japan*. – 1996. – V. 69. – № 12. – P. 3469–3473.
29. Multielement characterization of metal–humic substances complexation by size exclusion chromatography, asymmetrical flow field-flow fractionation, ultrafiltration and inductively coupled plasma–mass spectrometry detection: A comparative approach / E. Bolea, M.P. Gorris, M. Bouby, F. Laborda, J.R. Castilloa, H. Geckeis // *Journal of Chromatography A*. – 2006. – V. 1129. – № 2. – P. 236–246.
30. Mineral-water interface reactions of actinide / H. Geckeis, J. Lützenkirchen, R. Polly, T. Rabung, M. Schmidt // *Chemical Reviews*. – 2013. – V. 113. – № 2. – P. 1016–1062. URL: <https://doi.org/10.1021/cr300370h> (дата обращения 15.09.2020).
31. Results of the colloid and radionuclide retention experiment at the Grimsel Test Site (GTS), Switzerland–impact of reaction kinetics and speciation on radionuclide migration / H. Geckeis, T. Schafer, W. Hauser, T. Rabung, T. Missana, C. Degueldre, A. Mori, J. Eikenberg, Th. Fierz, W.R. Alexander // *Radiochimica Acta*. – 2004. – V. 92. – № 9–11. – P. 765–774.
32. Investigation of uranium–colloid interactions in soil by dual field-flow fractionation/capillary electrophoresis hyphenated with inductively coupled plasma–mass spectrometry / C. Claveranne-Lamolre, J. Aupiais, G. Lespes, J. Frayret, E. Pili, F. Pointurier, M. Potin-Gautier // *Talanta*. – 2011. – V. 85. – № 5. – P. 2504–2510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.07.100> (дата обращения 15.09.2020).
33. Langmuir D. Aqueous environmental geochemistry. – Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1997. – 600 p.
34. Uranium speciation in weathered granitic waste rock piles: an XAFS investigation / A. Tayal, S.D. Conradson, A. Kanzari, F. Lahrouch, M. Descostes, M. Gerard // *RSC Advances*. – 2019. – V. 9. – № 21. – P. 11762–11773. URL: <https://doi.org/10.1039/c9ra00961b> (дата обращения 15.09.2020).
35. Romanchuk A.Y., Vlasova I.E., Kalmykov S.N. Speciation of uranium and plutonium from nuclear legacy sites to the environment: a mini review // *Frontiers in Chemistry*. – 2020. – V. 8. – P. 1–10.
36. Колпакова М.Н., Гаськова О.Л., Наймушина О.Р. Озеро Эбейты, Россия: химико-органический и минеральный состав воды и донных отложений // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 1. – P. 111–123.
37. Update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium / R. Guillaumont, T. Fanghänel, J. Fuger, I. Grenthe, V. Neck, D.A. Palmer, M.H. Rand // *Chemical thermodynamics series* / Eds. F.J. Mompean et al. – Michigan: Elsevier Science, 2003. – V. 5. – 918 p.
38. A modelling exercise on the importance of ternary alkaline earth carbonate species of uranium(VI) in the inorganic speciation of natural waters / T. Vercouter, P.E. Reiller, E. Ansoborio, L. Février, R. Gilbin, C. Lomenech, V. Philippini // *Applied Geochemistry*. – 2015. – V. 55. – P. 192–198.
39. Mahoney J.J., Jakubowski R.T. Assessment of uranyl sorption constant on ferrihydrite – comparison of model derived constants and updates to the diffuse layer model database // *Uranium, mining and hydrogeology* / Eds. B. Merkel, A. Hasche-Berger. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2008. – P. 919–928.
40. Di Bonito M., Lofts S., Groenenberg J.E. Models of geochemical speciation: structure and application // *Environmental geochemistry. Site characterization, data analysis and case histories*. 2nd ed. / Ed. by B. de Vivo. – Amsterdam: Elsevier, 2018. – P. 237–305.

41. Reiller P.E., Descostes M. Development and application of the thermodynamic database PRODATA dedicated to the monitoring of mining activities from exploration to remediation // *Chemosphere*. – 2020. – V. 251. – 126301. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126301> (дата обращения 15.09.2020).
42. Semipalatinsk test site. Present state. 3rd ed. / Eds. E.G. Battyrbekov, S.N. Lukashenko. – Pavlodar: Press House, 2017. – 52 p.
43. Казакова Ю.И. Техногенная трещиноватость и химический состав вод зоны фильтрации горного массива Дегелен // *Вестник НЯЦ РК*. – 2005. – № 4. – С. 84–89.
44. Nazarbayev N.A., Shkolnik V.S., Battyrbekov E.G. Scientific, technical and engineering work to ensure the safety of the former Semipalatinsk Test Site. V. 1. – London: WorldWide Promedia, 2017. – 304 p.
45. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. 3rd ed. / Eds. W. Stumm, J.J. Morgan. – New York: Wiley, 1995. – 1040 p.
46. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы земли. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
47. Раимканова А.М., Айдарханова А.К., Лукашенко С.Н. Выщелачивание техногенных радионуклидов из грунта зоны навала «Атомного» озера на территории Семипалатинского испытательного полигона // *Ядерная и радиационная физика: Материалы 10 Международной конференции*. – Курчатов, 2015. – С. 167.
48. Zamana L.V. Isotopes of hydrogen and oxygen in nitrogen hot springs of Baikal Rift Zone in terms of interaction in the water–rock system // *Doklady Earth Sciences*. – 2012. – V. 442. – № 1. – P. 81–85.
49. Рихванов Л.П. Радиоактивность и радиоактивные элементы как фактор геологической среды и его использование в науках о Земле // *Разведка и охрана недр*. – 2017. – № 12. – С. 55–61.
50. Degueldre C., Joyce M.J. Evidence and uncertainty for uranium and thorium abundance: a review // *Progress of the Nuclear Energy*. – 2020. – V. 124. – № 4. – 103299. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103299> (дата обращения 15.09.2020).
51. Уран и торий в природных водах юго-востока Алтае-Саянской области / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, К.Д. Аракчаа, А.А. Хвашевская, И.С. Мазурова, О.Д. Аюнова, Ч.К. Ойдул, К.М. Рычкова // *Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции*. – Томск: Изд-о ТПУ, 2016. – С. 339–345.
52. Uranyl(VI) carbonate complex formation: Validation of the $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq.})$ species / G. Bernhard, G. Geipel, T. Reich, V. Brendler, S. Amayri, H. Nitsche // *Radiochimica Acta*. – 2001. – V. 89. – № 8. – P. 511–518. URL: <https://doi.org/10.1524/ract.2001.89.8.511> (дата обращения 15.09.2020).

Поступила 31.08.2020 г.

Информация об авторах

Торопов А.С., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Солдатова Е.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования гидрогеохимических и гидротермальных процессов Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук.

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.424.6:54.01(546.791+546.795):556.550.845

FORMS OF RADIONUCLIDES (U AND Th) MIGRATION IN NATURAL WATERS UNDER DIFFERENT GEOCHEMICAL CONDITIONS BASED ON COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL DATA

Andrey S. Toropov¹,
torop990@gmail.com

Evgeniya A. Soldatova²,
sea@geokhi.ru

Leonid P. Rikhvanov³

¹ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia.

² Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry Russian Academy of Sciences,
19, Kosygin street, Moscow, 119991, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is caused by the necessity to take into account the diversity of the migration forms of radionuclides under geochemical conditions changes, as well as prognosis of the radioecological status of hydroecosystems. On the territory of the Semipalatinsk Test Site, the migration of natural radionuclides in water systems is poorly investigated, the calculation of the migration forms of uranium and thorium with a change in geochemical conditions will be informative for understanding the migration of a wide range of transuranium radionuclides.

The aim of the research is to determine the forms of migration of uranium and thorium in natural waters depending on the particle size and, taking into account a wide range of components, to calculate the forms of their migration in waterstreams and lakes.

Objects: water of streams of the Degelen mountain massif, water of lakes of experimental sites of the Semipalatinsk Test Site, model hydrogeochemical systems.

Methods. Speciation of natural radionuclides were investigated in situ using the method of cascade fractionation. The pH and Eh of the waters were determined by potentiometry, total dissolved solids was determined by conductometry. The main water ions and some elements were determined by titrimetric (HCO_3^- , CO_3^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}), optical emission spectrometry (Na, K, Ca, Mg, Fe, Si), and ion chromatography (Cl^- , SO_4^{2-}). The content of dissolved organic substances was determined by the permanganate and dichromate oxidation, the method of catalytic combustion, and the intensity of the UV signal. The content of U and Th was determined by mass spectrometry.

Results. The features of U and Th transfer in different water bodies of Semipalatinsk Test Site are determined. The processes that control them are indicated. It was found that the sulfate ion in waterstreams is an indicator of water exchange intensity and the rate of oxidation of sulfide minerals, which determine the release of uranium significant concentrations into the solution. Uranium is associated with organic and organomineral complexes and is subjected to transformation of migration forms in the event of changes in the geochemical conditions of the environment. Thorium is more characterized by colloidal transport than uranium. Suspended components of natural waters dominate among migration forms of these elements. The Th/U ratio in dissolved form is rather stable compared to colloidal and suspended forms. For waters with various hydrodynamic regimes, there is a difference in the severity of the influence of the terrigenous component.

Key words:

Uranium, thorium, colloids, modeling, geochemical conditions, migration, calcium uranyl carbonate, radionuclides, minerals.

The reported study was funded by RFBR, project number no. 19-33-60030.

REFERENCES

- Medved I., Černý R. Modeling of radionuclide transport in porous media: a review of recent studies. *Journal of Nuclear Materials*, 2019, vol. 526, 151765.
- Zhang B., Wang X., Zhou J., Han Z., Liu Q., Wang W., Li R., Zhang B., Dou B. Regional geochemical survey of concealed sandstone-type uranium deposits using fine-grained soil and groundwater in the Erlan basin, north-east China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 216, 106573. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jexplo.2020.106573> (accessed 15 September 2020).
- Uranium in the environment. Mining impact and consequences.* Eds. B. Merkel, A. Hasche-Berger). Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2006. 896 p.
- Drozdak J., Leermakers M., Gao Y., Elskens M., Phrommavanh V., Descostes M. Uranium aqueous speciation in the vicinity of the former uranium mining sites using the diffusive gradients in thin films and ultrafiltration techniques. *Analytica Chimica Acta*, 2016, vol. 913, pp. 94–103. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.01.052> (accessed 15 September 2020).
- Pandit P., Mangala P., Saini A., Bangotra P., Kumar V., Mehra R., Ghosh D. Radiological and pollution risk assessments of terrestrial radionuclides and heavy metals in a mineralized zone of the siwalik region (India). *Chemosphere*, 2020, vol. 254, 126857. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126857> (accessed 15 September 2020).
- Post V.E.A., Vassolo S.I., Tiberghien C., Baranyikwa D., Miburo D. Weathering and evaporation controls on dissolved uranium concentrations in groundwater – a case study from northern Burundi. *Science of the Total Environment*, 2017, vol. 607–608, pp. 281–293. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.006> (accessed 15 September 2020).
- Alkinani M., Kanoua W., Merkel B. Uranium in groundwater of the Al-Batin Alluvial Fan aquifer, south Iraq. *Environmental Earth*

- Sciences, 2016, vol. 75, no. 10, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5685-3> (accessed 15 September 2020).
8. Placzek C.J., Heikoop J.M., House B., Linhoff B.S., Pelizza M. Uranium isotope composition of waters from South Texas uranium ore deposits. *Chemical Geology*, 2016, vol. 437, pp. 44–55. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.05.008> (accessed 15 September 2020).
9. Yang J., Zhang Z., Chen Z., Ge M., Wu W., Guo Z. Co-transport of U(VI) and gibbsite colloid in saturated granite particle column: role of pH, U(VI) concentration and humic acid. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 688, pp. 450–461. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.395> (accessed 15 September 2020).
10. Toropov A.S. Migration forms of anthropogenic radionuclides in tunnel waters at the Degelen Mountains, Semipalatinsk Test Site. *Geochemistry International*, 2020, vol. 58, no. 3, pp. 342–351.
11. Toropov A.S. Fractionation of technogenic radionuclides species in water bodies of Semipalatinsk Test Site. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 6, pp. 74–84. In Rus.
12. Kayukov P.G. Izucheniye radiatsionnoy obstanovki na territorii Respubliki Kazakhstan [Study of the radiation situation on the territory of the Republic of Kazakhstan]. *Otchet za 2004–2008 gg* [Report for 2004–2008]. Almaty, Volkovgeologiya Publ., 2008. Vol. 2. East Kazakhstan region. 177 p.
13. Gorlachev I., Kharkin P., Dyussebayeva M., Lukashenko S., Glushchenko G., Matiyenko L., Zheltov D., Kitamura A., Khlebnikov N. Comparative analysis of water contamination of the Shagan river at the Semipalatinsk test site with heavy metals and artificial radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 213, 06110. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106110> (accessed 15 September 2020).
14. Malkovsky V.I., Yudinsev S.V. Model of colloidal transportation of radionuclides by groundwater. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 470, no. 1, pp. 942–945. Available at: <https://doi.org/10.1134/S1028334X16090051> (accessed 15 September 2020).
15. Ure A.M., Davidson C.M. *Chemical speciation in the environment*. Glasgow, Blackwell Science, 2002. 452 p.
16. *Radioactive particles in the environment: sources, particle characterization and analytical techniques*. IAEA–TECDOC–1663. Vienna, International Atomic Energy agency, 2011. 90 p.
17. McCarthy J.F., Zachara J.M. Subsurface transport of contaminants. *Environmental Science Technology*, 1989, vol. 23, pp. 496–502.
18. Kersting A.B., Eford D.W., Finnegan D.L., Rokop D.J., Smith D.K., Thompson J.L. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site. *Nature*, 1999, vol. 397 (6714), pp. 56–59.
19. Markich S.J., Brown P.L. Actinide speciation and bioavailability in fresh and marine waters. *The heaviest metals: science and technology of the actinides and beyond*. Eds. W.J. Evans, T.P. Hanusa. USA, Wiley, 2018. pp. 367–400. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119951438.eibc2559> (accessed 15 September 2020).
20. *Environmental colloids and particles: behavior, separation and characterization*. Eds. K.J. Wilkinson, J.R. Lead. England, Wiley, 2007. 502 p.
21. Ilina S.M., Lapitskiy S.A., Alekhin Y.V., Viers J., Benedetti M., Pokrovsky O.S. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–mire–humic lake–river–large oligotrophic lake of a Subarctic watershed. *Aquatic Geochemistry*, 2016, vol. 22, pp. 65–95.
22. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects. *Geochemistry International*, 2010, vol. 48, no. 13, pp. 1263–1387.
23. Lydersen E., Bjornstad H.E., Salbu B., Pappas A.C. *Trace element speciation in natural waters using hollow-fiber ultrafiltration*. Speciation of metals in water, sediment and soil systems. Ed. by L. Landner. Berlin, Heidelberg, Springer, 1987. Vol. 11, pp. 85–97.
24. Lind O.C., Oughton D.H., Salbu B., Skipperud L., Sickel M.A., Brown J.E. Transport of low 240Pu/239Pu atom ratio plutonium–species in the Ob and Yenisey Rivers to the Kara Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, vol. 251, no. 1–2, pp. 33–43.
25. Salbu B., Kashparov V., Lind O.C., Garcia-Tenorio R., Johansen M.P., Child D.P., Sanchof R.C. Challenges associated with the behaviour of radioactive particles in the environment. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018, vol. 186, pp. 101–115.
26. Bouby M., Finck N., Geckeis H. Flow field–flow fractionation (FFF) coupled to sensitive detection techniques: a way to examine radionuclide interactions with nanoparticles. *Mineralogical Magazine*, 2012, vol. 76, no. 7, pp. 2709–2721.
27. Baalousha M., Stoll S., Motelica-Heino M., Guigues N., Braibant G., Huneau F., Le Coustumer P. Suspended particulate matter determines physical speciation of Fe, Mn, and trace metals in surface waters of Loire watershed. *Environmental Science Pollution Research*, 2019, vol. 26, no. 6, pp. 5251–5266. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1416-5> (accessed 15 September 2020).
28. Itoh A., Kimata C., Miwa H., Sawatari H., Haraguchi H. Speciation of trace metals in pond water as studied by liquid chromatography/inductively coupled plasma mass spectrometry. *Bulletin of Chemical Society of Japan*, 1996, vol. 69, no. 12, pp. 3469–3473.
29. Bolea E., Gorriz M.P., Bouby M., Laborda F., Castillo J.R., Geckeis H. Multielement characterization of metal-humic substances complexation by size exclusion chromatography, asymmetrical flow field–flow fractionation, ultrafiltration and inductively coupled plasma–mass spectrometry detection: A comparative approach. *Journal of Chromatography A*, 2006, vol. 1129, no. 2, pp. 236–246.
30. Geckeis H., Lützenkirchen J., Polly R., Rabung T., Schmidt M. Mineral–water interface reactions of actinide. *Chemical Reviews*, 2013, vol. 113, no. 2, pp. 1016–1062. Available at: <https://doi.org/10.1021/cr300370h> (accessed 15 September 2020).
31. Geckeis H., Schafer T., Hauser W., Rabung T., Missana T., Degeldre C., Mori A., Eikenberg J., Fierz Th., Alexander W.R. Results of the colloid and radionuclide retention experiment at the Grimsel Test Site (GTS), Switzerland–impact of reaction kinetics and speciation on radionuclide migration. *Radiochimica Acta*, 2004, vol. 92, no. 9–11, pp. 765–774.
32. Claveranne-Lamole C., Aupiais J., Lespes G., Frayret J., Pili E., Poincurier F., Potin-Gautier M. Investigation of uranium–colloid interactions in soil by dual field–flow fractionation/capillary electrophoresis hyphenated with inductively coupled plasma–mass spectrometry. *Talanta*, 2011, vol. 85, no. 5, pp. 2504–2510. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2011.07.100> (accessed 15 September 2020).
33. Langmuir D. *Aqueous environmental geochemistry*. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1997. 600 p.
34. Tayal A., Conradson S.D., Kanzari A., Lahrouch F., Descostes M., Gerard M. Uranium speciation in weathered granitic waste rock piles: An XAFS investigation. *RSC Advances*, 2019, vol. 9, no. 21, pp. 11762–11773. Available at: <https://doi.org/10.1039/c9ra00961b> (accessed 15 September 2020).
35. Romanchuk A.Y., Vlasova I.E., Kalmykov S.N. Speciation of uranium and plutonium from nuclear legacy sites to the environment: a mini review. *Frontiers in Chemistry*, 2020, vol. 8, pp. 1–10.
36. Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naimushina O.S. Ebeity Lake, Russia: chemical, organic and mineral composition of water and bottom sediments. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 1, pp. 111–123. In Rus.
37. Guillaumont R., Fanghänel T., Fuger J., Grenthe I., Neck V., Palmer D.A., Rand M.H. Update on the chemical thermodynamics of uranium, neptunium, plutonium, americium and technetium. *Chemical thermodynamics series*. Ed. by F.J. Mompean. Michigan, Elsevier Science, 2003. Vol. 5, 918 p.
38. Vercouter T., Reiller P.E., Ansoborlo E., Février L., Gilbin R., Lomenech C., Philippini V. A modelling exercise on the importance of ternary alkaline earth carbonate species of uranium(VI) in the inorganic speciation of natural waters. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 55, pp. 192–198.
39. Mahoney J.J., Jakubowski R.T. Assessment of uranyl sorption constant on ferrihydrite – comparison of model derived constants and updates to the diffuse layer model database. *Uranium, mining and hydrogeology*. Eds. B. Merkel, A. Hasche-Berger. Berlin, Heidelberg, Springer, 2008. pp. 919–928.
40. Di Bonito M., Lofts S., Groeneweg J.E. Models of geochemical speciation: structure and application. *Environmental geochemistry. Site characterization, data analysis and case histories*. 2nd ed. Ed. by B. De Vivo. Amsterdam, Elsevier, 2018. pp. 237–305.
41. Reiller P.E., Descostes M. Development and application of the thermodynamic database PRODATA dedicated to the monitoring

- of mining activities from exploration to remediation. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, 126301. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126301> (accessed 15 September 2020).
42. Semipalatinsk test site. *Present state*. 3rd ed. Eds. E.G. Batyrbekov, S.N. Lukashenko. Pavlodar, Press House, 2017. 52 p.
 43. Kazakova Yu.I. Tekhnogennaya treshchinovatost i khimicheskiy sostav vod zony filtratsii gornogo massiva Degelen [Technogenic fracture and chemical composition of water filtration zone of Del-egen mountain massif]. *Vestnik NYAC RK*, 2005, no. 4, pp. 84–89.
 44. Nazarbayev N.A., Shkolnik V.S., Batyrbekov E.G. *Scientific, technical and engineering work to ensure the safety of the former Semipalatinsk Test Site*. Vol. 1. London, WorldWide Promedia, 2017. 304 p.
 45. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. 3rd ed. Eds. W. Stumm, J.J. Morgan. New-York, Wiley, 1995. 1040 p.
 46. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery zemli* [Isotopy of the Earth's Hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
 47. Raimkanova A.M., Aydarkhanova A.K., Lukashenko S.N. Vyshchelachivanie tekhnogennykh radionuklidov iz grunta zony navala «Atomnogo» ozera na territorii Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona [Leaching of technogenic radionuclides from the soil of the pile of the «Atomic» lake on the territory of the Semipalatinsk test site]. *Materialy 10 Mezhdunarodnoy konferentsii. Yadernaya i radiatsionnaya fizika* [Proc. of the 10th International Conference. Nuclear and Radiation Physics]. Kurchatov, 2015. pp. 167.
 48. Zamana L.V. Isotopes of hydrogen and oxygen in nitrogen hot springs of Baikal Rift Zone in terms of interaction in the water–rock system. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 442, no. 1, pp. 81–85.
 49. Rihvanov L.P. Radioactivity and radioactive elements as a factor of the geological environment and its use in earth sciences. *Razvedka i okhrana neдр*, 2017, no. 12, pp. 55–61. In Rus.
 50. Degueldre C., Joyce M.J. Evidence and uncertainty for uranium and thorium abundance: a review. *Progress of the Nuclear Energy*, 2020, vol. 124, no. 4, 103299. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103299> (accessed 15 September 2020).
 51. Kopylova Yu.G., Guseva N.V., Arakchaa K.D., Khvashchevskaya A.A., Mazurova I.S., Ayunova O.D., Oidup Ch.K., Rychkova K.M. Uran i toriy v prirodnykh vodakh yuga-vostoka Altae-Sayanskoy oblasti [Uranium and thorium in the natural waters of the South-East of the Altai-Sayan Region]. *Radioaktivnost i radioaktivnye elementy v srede obitaniya cheloveka. Materialy V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Radioactivity and radioactive elements in the human environment. Proc. of the Vth International conference]. Tomsk, TPU Publ. House, 2016. pp. 339–345.
 52. Bernhard G., Geipel G., Reich T., Brendler V., Amayri S., Nitsche H. Uranyl(VI) carbonate complex formation: Validation of the $\text{Ca}_2\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3(\text{aq.})$ species. *Radiochimica. Acta*. 2001, vol. 89, no. 8, pp. 511–518. Available at: <https://doi.org/10.1524/ract.2001.89.8.511> (accessed 15 September 2020).

Received: 31 August 2020.

Information about the authors

Andrey S. Toropov, Cand. Sc., senior researcher, Lomonosov Moscow State University.

Evgeniya A. Soldatova, Cand. Sc., senior researcher, Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry Russian Academy of Sciences.

Leonid P. Rikhvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

ПРОЦЕДУРЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЗМОВ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джангхорбани Мехран¹,
mehr.janghorbani@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы вызвана необходимостью идентифицировать, понять, прогнозировать и контролировать физические механизмы, сопровождающие процесс очистки скважин от бурового шлама. Риск некачественной очистки создает условия, обостряющие процессы заклинивания трубы, управления скважиной, снижения скорости бурения, износа бурового специального оборудования, особенно при увеличении количества отверстий, пробуренных под большими углами. Такие экстремальные ситуации характерны для протяженных горизонтальных скважин. В настоящее время они получили широкое распространение в силу своей повышенной производительности и исключительной эффективности в способах достижения определенных продуктивных пластов. Все это характеризует проблему поиска и разработки эффективных методов очистки скважин как одну из важнейших задач современного бурения.

Цель: глубже понять явления в масштабе модели и фактически разработать методы прогнозирования процессов при гидравлической очистке горизонтальных скважин от шлама для определения приоритетов будущих научных и практических разработок процессов очистки.

Методы: современные методы теоретического и экспериментального моделирования течений твердых частиц с потоком вязкой среды в ограниченных областях, характерных для задач нефтегазовой отрасли; практические методы исследования таких вопросов, как седиментация, коагуляция, течение реологически сложных вязких сред в затрубном пространстве скважин с произвольной образующей ее ствола.

Результаты. Представлен обзор и анализ современных экспериментальных и теоретических результатов моделирования процесса засорения продуктами выработки горизонтальных скважин. Численно исследованы процессы и механизмы транспорта шлама на базе оригинальных редко используемых в практике приложений математических моделей. По результатам мониторинга процессов сформулировано множество критериальных связей и эмпирических правил, которыми руководствуются при техническом проектировании элементов оборудования и прогнозах оптимальных режимов гидравлической очистки. Критически оценены возможности моделей, методов, инструментария опытного оборудования для регистрации, прогноза и управления режимами поступательно-вращательного движения смесей в скважинах с криволинейной образующей стенки. Даны объяснения противоречивости наблюдаемых и рассчитанных процессов при гидравлической очистке в рамках используемого оборудования.

Ключевые слова:

Шлам, частицы, скважина, очистка, моделирование, гидродинамика, реология, структура, напряжения.

Введение

Засорение рабочих элементов бурового оборудования продуктами выработки ухудшает качество и эффективность их функционирования. Последние 30–40 лет для нефтегазовой отрасли отмечены разнообразными достижениями, многочисленными внедрениями новых технологий, препятствующих накоплению шлама. В этом смысле умение воздействовать на реологические свойства бурового раствора имеет большое значение. Поэтому понятно желание инженера-механика идентифицировать, понять, прогнозировать и контролировать физические механизмы, приводящие к возникновению засорения. Однако скважинную среду чрезвычайно трудно моделировать в лаборатории. Она характеризуется высокими давлениями, температурными напорами, пространственными изменениями структуры многофазного потока и подвижностью элементов технологического оборудования. В настоящее время накоплен большой объем эмпирической информации о динамической картине процесса засорения, сформулировано множество эм-

пирических правил, которыми руководствуются при техническом проектировании элементов оборудования. Эти правила основаны на корреляциях между измерениями в модельном масштабе и наблюдениями рабочих параметров и процессов.

Необходимость глубже понять явления в масштабе модели привела исследователей к созданию ряда уникальных экспериментальных стендов для моделирования транспорта сложной среды. Причем к ряду крупнейших стендов следует отнести опытную установку, размещенную в университете Талса, штат Оклахома, США [1, 2]. Основными элементами такой установки являются: 1) испытательная секция, которая включает большую, обычно прозрачную трубу с эксцентрично расположенной внутренней вращающейся трубой; 2) средство для изменения угла наклона испытательного участка (обычно с использованием гидравлических домкратов); 3) жидкостный насос (как правило, центробежного типа) и винтовой насос для добавления продуктов выработки частиц твердой фазы; 4) набор систем, позволяющих разделять состав выработки на дистальных участках измерительной

области; 5) устройства записи и измерений, представляющие собой камеры с замкнутым контуром, датчики давления, анемометры и т. п.; 6) резервуары, трубы и фитинги. Заметим, что при планировании и постановке экспериментов длину испытательной секции выбирают достаточно протяженной, чтобы при измерениях исключить влияние возмущений на структуру развитого потока от эффектов входа/выхода. Для дисперсных систем моделирование скважинных условий с хорошей точностью обеспечивается на длинах порядка $x > 50D$, где x – локальная осевая независимая переменная, D – гидравлический диаметр. При этом закономерности движения выработки определяются по серии данных измерений структуры вязкого ламинарно-турбулентного потока.

С учетом сказанного, целью экспериментальных исследований процесса транспортировки шлама на базе указанного оборудования является понимание и контроль явлений и механизмов этого сложного процесса. Необходимость представления таких результатов диктуется соображениями, что новые научные и экспериментальные возможности позволяют значительно пополнить объем знаний об особенностях и закономерностях транспорта шлама и очистки скважин. И эти сведения помогут расставить приоритеты будущих научных работ.

Проблемы исследования транспорта шламов

Прогноз процессов в вертикальных скважинах

Блицэкскурс в историю проблем поиска и построения решений по интенсификации очистки скважин от шламов показывает, что эти вопросы составили предмет исследований с первых попыток анализа вертикальных скважин в 1940-х гг. Главная цель этих исследований заключалась в получении критериальных связей, определяющих процесс осаждения дисперсных частиц сферической формы в несущей среде с ньютоновскими свойствами. Такое допущение о буровом растворе представляется достаточно грубым. Поэтому прогноз осаждений и коагуляции частиц в аномально вязких диспергируемых потоках, к каковым относится раствор с псевдопластическими реологическими свойствами, по соотношениям для ньютоновских систем не представляется корректным. И первым, кто обратил на это внимание, был Р. Пиготт [3], который предложил течение бурового раствора в вязкой области структуры гидродинамического пограничного слоя описывать с помощью кажущейся вязкости, а в инерционной зоне (с доминированием турбулентных эффектов процессов переноса) – моделью раствора со свойствами ньютоновской среды. Причем существенного отличия влияния реологии (при ньютоновском и аномально вязком характере деформаций) в турбулентном процессе не обнаружено.

Далее Х. Холл и соавторы [4], предполагая раствор бингамовской средой, эмпирически сформулировали зависимость между коэффициентом сопротивления трения и числом Рейнольдса для дисперсных частиц сферической и дискообразной формы при турбулентном и ламинарном режимах течения, что позволило исследовать изменения скорости скольжения частиц в реальных условиях течения смеси. Сравнивая результаты его эмпирических уравнений с

результатами натурных экспериментов, было обнаружено, что корреляционные соотношения для режима ламинарного течения весьма успешны, но не удовлетворяются связи, ориентированные на прогноз турбулентных условий с точностью порядка 15 % и более.

К. Уильямс и соавторы [5] сосредоточили свои усилия на детальном изучении процессов влияния подвижности внутренней стенки буровой трубы и определении минимального значения ее скорости вращения, необходимой для удаления шлама из ствола скважины, а также на проблемах влияния различных свойств бурового раствора на его несущую способность. Для этого авторы провели полномасштабные натурные лабораторные эксперименты, которые сводились к следующему. Такие эксперименты выполнялись в испытательной 150-метровой скважине с использованием алюминиевых дисков разных размеров. Это исследование заслуживает внимания, поскольку в нем было использовано 23 разнообразных флюида с различной плотностью от 8,33 ft/gal (вода) до 14,8 ft/gal и вязкостью от 1 до 200 сП. Заметим, что это был первый эксперимент, в котором использовалась вращающаяся буровая труба с минимальным значением скорости вращения порядка 200 ft/min. Также экспериментами установлено, что с вращающейся буровой колонной можно добиться эффективного удаления выработки и при значительно более низких скоростях вращения (например, 124 ft/min при использовании воды и менее при использовании более тяжелых и более вязких растворов). Чтобы объяснить эти результаты, были проведены лабораторные эксперименты, где было замечено, что частицы дисперсной фазы в форме диска ведут себя совершенно иначе, чем в форме сферы, поскольку их скорость скольжения резко изменяется в зависимости от их ориентации в потоке (в 1,5 раза для ламинарного потока; в 13 раз для турбулентного режима). Установлено, что частицы в форме диска имели тенденцию сосредотачиваться в области твердой стенки, ближе к границам, где профиль скорости уменьшается. А в условиях турбулентного закрученного потока профиль скорости приобретал специфическую параболическую форму, характерную для ламинарного течения, что говорило о формировании условий ламинаризации течения с подавлением напряжений Рейнольдса у стенки (стабилизирующий механизм крутки) и интенсификации течения в ядре. При комбинации этих процессов дисперсные частицы более эффективно транспортировались из скважины. Также стоит отметить, что весьма важным при удалении выработки было установление факта: при получении значения параметра (отношения продольного размера частицы к соответствующему поперечному) меньше 0,167 транспортировка становилась чрезвычайно проблематичной, поскольку частицы шлама имели тенденцию перестраиваться в пространственном течении при их обтекании диспергируемой средой. Все это показывает, что вопросы удаления частиц выработки потоком еще недостаточно изучены и требуют дополнительных исследований.

Е. Хопкин [6] попытался в рамках простой лабораторной методики для качественного определения вязкости жидкости, известной как «вязкость в воронке», проанализировать эффективность процесса очистки буровым раствором. Этот метод определения качественного значения вязкости широко используется в промышленности. Измерения вязкости осуществляется за время (в секундах), необходимое для того, чтобы *кварт* (1 кв \approx 0,95 л) бурового раствора «выпал» из стандартной воронки, называемой *воронкой Марша*. Заметим, что в момент публикации [6] обычно использовали буровые растворы с вязкостью воронки, превышающей 200 с/кв, с целью достижения эффективной очистки отверстий (с концентрацией менее 5 % в затрубном пространстве). Однако, поскольку практическое использование в очистке аномально вязких буровых растворов нежелательно – они дороги в изготовлении, увеличивают нагрузки на пласт и буровое оборудование, снижают скорость бурения, в [6] выполнены лабораторные эксперименты с 52 разнообразными частицами произвольной формы (различной сферичности) и 13 различными буровыми растворами с вязкостью воронки от 26 до 1000 с/кв. В результате опытов обнаружено, что существует выраженная корреляция между вязкостью воронки и пропускной способностью буровых растворов. Поскольку вязкость воронки тесно связана с пределом текучести жидкости, предполагается, что деформируемые среды «с высокой вязкостью при небольшой скорости сдвига» – наилучший объект для очистки вертикальных отверстий. Современное производство буровых растворов использует этот принцип. Такие буровые жидкости имеют низкую вязкость в областях с высокой скоростью сдвига, например, при прохождении сквозь насадки долота, и, следовательно, требуют меньшей мощности насоса. А в областях с низкоскоростным потоком кольцевого пространства будут проявляться высокие вязкости, способствующие очистке отверстий.

Попытки сформулировать надежную корреляцию для предсказания скоростей скольжения твердых частиц выработки были продолжены У. Цейдлером [7]. Он пришел к выводу, что для чисел Рейнольдса $Re > 1500$ экспериментальные результаты скоростей осаждения частиц начинают существенно отличаться от предсказанных по формулам, учитывающим их сферическую форму. То же самое наблюдалось в режимах с числами Рейнольдса $Re < 2$, характерных для ползущего потока. Другим важным результатом указанных исследований является факт невозможности 100 %-го выноса выработки из скважины в силу особенностей ее взаимодействия со стенкой в условиях вращения и слабой инерционности частиц шлама в непосредственной ее окрестности. Обобщение данных позволило сформулировать корреляционное уравнение для прогноза максимального количества извлекаемой выработки, включающей частицы произвольной геометрии при турбулентном течении водяного потока. Кроме того, У. Цейдлером [7] представлены связи для случаев очистки в режимах вращения буровой трубы. Однако эти результаты тре-

буют дополнительного анализа из-за больших погрешностей в оценках реальных процессов.

В целом анализ публикаций по проблемам организации очистки вертикальных скважин периода 80-х гг. XX в. позволяет отметить, что основное внимание исследователей сводилось к формулировке связи, описывающей скорость скольжения частиц шлама (известной как единственный определяющий фактор в очистке вертикальных скважин) вариацией между скоростями жидкости и твердых частиц смеси. Установлено, что скорость скольжения зависит от числа Рейнольдса частицы, которое в рамках теории подобия и анализа размерностей имеет вид (1):

$$Re = \frac{D_s V_s \rho_f}{\mu}. \quad (1)$$

Здесь D_s – диаметр частиц; V_s – средняя скорость скольжения частиц; ρ_f ; μ – плотность и вязкость жидкости соответственно. Изменения V_s в широком диапазоне значений Re отражают критериальные связи следующего вида:

$$V_s = \begin{cases} \frac{g D_s^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \mu} - \\ \text{соотношение Стокса, при } Re < 2 - \end{cases} \quad (2)$$

$$9 \left(\frac{D_s (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0,5} - \\ \text{соотношение Реттингера, при } Re > 1500 - \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{13,42 (\rho_s - \rho_f)^{0,782} D_s^{1,35}}{\rho_f^{0,218} \mu^{0,564}} - \\ \text{соотношение Цейдлера, при } 2 < Re \leq 15 - \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{13,88 (\rho_s - \rho_f)^{0,612} D_s^{0,836}}{\rho_f^{0,388} \mu^{0,224}} - \\ \text{соотношение Цейдлера, при } 15 < Re \leq 80 - \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{17,88 (\rho_s - \rho_f)^{0,516} D_s^{0,548}}{\rho_f^{0,484} \mu^{0,032}} - \\ \text{соотношение Цейдлера, при } 80 < Re \leq 1500 - \end{cases} \quad (6)$$

Заметим, что зависимости (2)–(6) сформулированы для ньютоновских сред и сферических частиц, но с помощью понятий *эквивалентной вязкости* их можно использовать и для неньютоновских жидкостей с произвольной геометрической формой частиц. Однако такое обобщение не лишено трудностей, по существу, приводящих к неопределенностям и противоречивости оценок эффектов течения жидкости, сопровождающих транспорт выработки. Поэтому представляется целесообразным подробнее остановиться на аспектах моделирования реологии аномально вязких сред, весьма осложняющих прогноз транспорта шлама даже в сравнении с более простым случаем несжимаемого течения.

Прежде всего, напомним, что ньютоновский реологический закон для несжимаемой жидкости связывает девиаторную часть тензора напряжений (касательных/сдвиговых напряжений) с симметричным тензором скоростей деформации в виде $\bar{\tau} = \mu \bar{S}$.

Причем динамический коэффициент вязкости (μ) зависит от локальных значений температуры (T) и давления (P), состава смеси, но не зависит от $\bar{\tau}$ или $\bar{\dot{S}}$. Для простых типов аномально вязких сред можно записать связь (7):

$$\bar{\tau} = \bar{\eta} \bar{\dot{S}}, \quad (7)$$

принимая неньютоновскую динамическую вязкость скалярной величиной и функцией $\eta = \eta(\bar{\tau}, \bar{\dot{S}}, T, P)$. Выбор различных эмпирических реологических законов (моделей жидкости) для описания зависимости скаляра η от тензорных параметров $\bar{\tau}$ или $\bar{\dot{S}}$ составляет одну из проблем обобщения, поскольку как скалярная функция тензора – вязкость η – должна зависеть только от инвариантов $\bar{\dot{S}}$, что есть суть таких особых комбинаций компонентов $\bar{\dot{S}}$, которые преобразуются как скаляры при вращении системы координат:

$$I_1 = (\bar{\dot{S}}; \delta) = \sum_i \dot{S}_{ii}; \quad I_2 = (\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}}) = \sum_i \sum_j \dot{S}_{ij} \dot{S}_{ji}; \\ I_3 = \det(\bar{\dot{S}}) = \sum_i \sum_j \sum_k \varepsilon_{ijk} \dot{S}_{li} \dot{S}_{2j} \dot{S}_{3k},$$

δ – единичный тензор. Так как в нашем случае первый инвариант – $I_1=0$ (несжимаемая жидкость), то для замыкания (7) требуется связь от остальных инвариантов – $\eta = \eta(I_2, I_3)$. Ее получение связано с необходимостью учета многих деталей жидкости, описываемого процесса и сопряжено со сложностями теоретического и экспериментального характера. Учитывая, что для многих простых потоков типа аксиального течения в трубах, тангенциального течения в области между концентрическими цилиндрами имеем $I_3=0$ (и не слишком существенен для других потоков), допускают, что замыкание вязкости соответствует функции $\eta = \eta(I_2)$. Именно для этого частного случая и были предложены эмпирические (практические) модели $\eta = \eta(\bar{\tau}, \bar{\dot{S}})$, в которых вязкость зависит от потока количества движения и отвечает процессу со сложной геометрией:

- вязкопластическая модель (8) жидкости (модель Бингама–Шведова)

$$\bar{\tau} = \left\{ \mu_0 + \frac{\tau_0}{[0,5(\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}})]^{0.5}} \right\} \bar{\dot{S}} \text{ при } 0,5(\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}}) > \tau_0^2 \\ \text{и } \bar{\tau} = 0, \bar{\dot{S}} = 0 \text{ при } 0,5(\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}}) < \tau_0^2 \quad (8)$$

и жидкость типа Гершели–Балкли (9), как частный случай модели Бингама –

$$\bar{\tau} = \tau_0 + k \bar{\dot{S}}^n; \quad (9)$$

- степенная модель (жидкости Оствальда–Вейля) типа (10)

$$\bar{\tau} = \left\{ m \left[0,5(\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}}) \right]^{n-1} \right\} \bar{\dot{S}}, \quad (10)$$

где m, n – модельные константы.

Заметим, что практическая польза от указанных модельных связей заключается в возможности описания реофизических особенностей изменения неньютоновской вязкости, η , своим общим видом. На это указывают слагаемые в фигурных скобках модели (8), (10). Поэтому, вводя η в соответствующие реологические связи (вместо μ), а также необходимые замыкания в соответствующей системе координат для членов $(\bar{\tau}; \bar{\tau})$ или $(\bar{\dot{S}}; \bar{\dot{S}})$, будем иметь замыкания математических моделей к описанию деформационных процессов в общем случае учета влияния изменений реологии рабочей жидкости на транспорт шлама.

В вопросах уяснения характера влияния геометрии частицы на процесс очистки полезна рекомендация Х. Уоделла [8] по учету эквивалентной сферичности частицы в виде параметра – отношения площади поверхности сферы с объемом, подобным рассматриваемой частицы, к площади поверхности частицы, которая формулируется в виде (11):

$$\psi = \frac{\pi^{1/3} (6V_p)^{2/3}}{A_p}, \quad (11)$$

где V_p – объем частицы; A_p – площадь поверхности частицы. Заметим, что соотношения (2)–(6) стоит считать корректными при небольших значениях эквивалентной вязкости. В случае анализа процессов с аномально вязкой реологией и нетривиальной формой частиц (например, дискообразной, часто встречаемой в буровых шламах), а также осложненных вращением бурильной трубы, эти уравнения следует применять с осторожностью при контроле точности процессов. Учитывая эти особенности, Т. Зиферман с соавторами [9] провели полное исследование процесса транспортировки шлама в вертикальных скважинах (на экспериментальной установке длиной 140 ft) и оценили влияние на эффективность процесса следующих параметров: реологических свойств бурового раствора (с примесями нефти и воды); скорости в кольцевом пространстве (от 4 до 200 ft/min); размера частиц выработки; плотности жидкости (12–15 ft/gal); скорости вращения (0–200 об/мин); скорости бурения; эксцентриситета бурильной трубы и размера кольцевого пространства. Исследование ориентировано на серию вопросов: установление необходимости повышения/понижения вязкости бурового раствора для очистки скважины; определение значений требуемой скорости для предотвращения чрезмерного накопления продуктов выработки в затрубном пространстве; поиск диапазона изменений кольцевой скорости для зон замедленного бурения; уяснение связи между ростом массы бурового раствора и транспорта шлама; снижение кольцевой скорости, интенсивности вращения бурильной трубы; изменение эксцентриситета, размера кольцевого пространства и их влияние на выработку; а также транспорт шлама с кольцевой скоростью порядка 100–120 ft/min, а также при каких

условиях по скоростям и составу «идеального» бурового раствора это возможно.

Результаты (Зиферман и соавторы [9]) процесса транспорта буровых шламов в вертикальных скважинах показали: 1) наиболее важными, влияющими на эффективность транспорта шламов, являются скорость потока и реологические свойства раствора; 2) скорости потока около 50 ft/min вполне достаточны для эффективной очистки скважин; 3) корреляционные связи имеют погрешности порядка 10–15 % при ламинарном режиме и 25 % – при турбулентном; 4) плотность раствора слабо влияет на процесс очистки скважин; 5) вращение трубы наряду с остальными факторами незначительно влияет на процесс очистки. Детальные исследования сложных реологических систем позволили У. Цейдлеру уточнить предложенные ранее уравнения для определения скорости скольжения частиц. Так, в [10] им было предложено новое уравнение (11) для расчета скорости скольжения частиц выработки и поля концентрации частиц для вида числа Рейнольдса в потоке жидкости со степенной реологией:

$$\text{Re} = \frac{\rho_s v_s^{2-n} d_s^n}{k C^{n-1}}. \quad (11)$$

Здесь k и n – коэффициенты (9); d_s – эквивалентный диаметр частицы; C – коэффициент, определяемый формой частицы.

Р. Томас и соавторы [11] проверили уравнения Цейдлера и пришли к выводу, что они хорошо описывают процесс только при высоких скоростях потока и если скорость потока в два и более раз превышает скорость свободного падения частиц. Было установлено, что при данных условиях погрешность уравнений Цейдлера по концентрациям составила порядка 8 %. Но при невысоких скоростях потока погрешность увеличивалась до 90 %. Погрешность определения скорости скольжения составила 3...15 %-ую величину, причем на ее рост влияла интенсификация процесса течения. Также в [11] отмечено, что вращение трубы способствует процессу очистки, но: 1) этот эффект значителен только при низких скоростях потока; 2) для каждой скорости потока есть определенный уровень скорости вращения, выше которого обнаруженный эффект не увеличивается с ростом значений крутки трубы. По нашему мнению, в данных процессах проявляются механизмы вихревого перехода, способствующие реламинаризации потока, требующие детального исследования.

С. Хуссейни и соавторы [12], продолжая это направление исследований, проанализировали влияние размера частиц на погрешность уравнения Цейдлера и пришли к выводу, что эти уравнения достоверны лишь при определенных размерах частиц (больше 0,79 см диаметра). Наряду с этим исследование подтвердило заключение Е. Хопкина. Так, анализируя бингамовскую жидкость, в [12] показано, что эффекты от изменений компонент тензора скоростей деформаций проявляются заметнее в сравнении с изменениями пластической вязкости в диапазоне низких значений скоростей потока. В условиях интенсивного

течения с высокими компонентами вектора скорости влияние реологических процессов заметно ослабевало. Все это позволило считать, что с точки зрения эффективности очистки скважин предпочтительнее выглядят растворы, представляющие собой псевдопластические среды, с высоким пределом текучести.

В заключение данной части стоит отметить, что по данным результатам, спектру фиксируемых геометрических и физических особенностей, сопровождающих транспорт, нельзя с определенной уверенностью считать, например, какие механизмы будут определять течение шлама в сложной конфигурации скважины, поскольку проблематично фиксировать структуру и состав примеси в кольцевой области. Также требуются детальные исследования по уяснению механизмов седиментации и коагуляции частиц шлама в конкретных условиях течения на других криволинейных участках скважины.

Отдельные проблемы моделирования процессов транспорта в геометриях ствола скважин, отклоненных от вертикальной плоскости

Учитывая опыт и результаты анализа особенностей транспорта выработки в вертикальных участках скважины, естественным и целесообразным представляется обращение к теоретико-экспериментальным исследованиям течений шлама в конфигурациях с общей криволинейной образующей ее ствола. Уяснение закономерностей таких течений наряду с разработкой эффективных методов очистки также позволит отобрать данные для построения новых и совершенствования имеющихся методов, методик прогноза гидродинамики вязких систем. Библиографический анализ работ этого направления показывает, что одними из первых исследователей, занимавшихся изучением процесса транспорта шламов в криволинейных скважинах, были П. Томрен и соавторами [13], К. Фудзи и М. Сато [14]. В частности, последняя работа посвящена экспериментам в скважинах с углами отклонения от вертикали порядка 45...60°. По результатам Фудзи и Сато [14] следует считать не вполне адекватными, поскольку процессы транспорта соответствуют высоким скоростям течения (более 3 м/с), которые очень редко встречаются в практике процессов бурения, а тестовый участок был достаточно коротким (около 3м) и не обеспечивал существование режима гидродинамически стабилизированного течения в стационарных условиях.

П. Томрен и соавторы [13] разработали экспериментальную установку длиной 40 ft с возможностями изменения угла наклона, подвижности внутренней стенки трубы и соосности ее положения. К исследованию процессов транспорта шлама привлекались реальные по свойствам растворы из месторождения в комбинации состава (вода; низко- и высоковязкий карбопол; высоко- и низковязкий бентонит) в условиях ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения. Следует отметить, что все жидкости (за исключением воды) соответствовали группе неньютоновских сред со степенной реологической связью. Серия их измерений из 242 случаев привела к следу-

ющим выводам: 1) при углах наклона больше 40° , несмотря на скорость потока, эксперименты постоянно фиксировали процесс образования слоя шлама в нижней части кольцевого пространства. Причем шламы, находящиеся в составе этого слоя, очень трудно удалялись из скважины; 2) процесс транспорта шламов в условиях турбулентного режима отличался высокой и стабильной эффективностью в сравнении с ламинарными условиями; 3) обнаружено, что существует определенный уровень вязкости рабочей жидкости, при которой достигается эффективность транспортировки шламов. Так, в количественном выражении очистка под действием вязких сил значительно в сравнении с попыткой ее управления инерционным механизмом за счет увеличения скорости потока. Также в части данного замечания показано, что жидкости при любой своей скорости необходима хотя бы минимальная вязкость для способности выносить частицы шлама. Более того, жидкости с большей вязкостью работают лучше, чем аналогичные системы с низкой вязкостью; 4) на наш взгляд, заключение по эффектам влияния вязкости представляется *самым спорным* (поскольку требуется детальная параметризации процесса с целью выяснения: при каких условиях анализировалось наложенное на поток вращение?). Так, показано, что вращение трубы не оказывает значительного влияния на процесс очистки скважин ни в ламинарном, ни в турбулентном режимах течения жидкости. Заметим, что данный вывод подтверждал заключение Т. Зиферманна при исследовании процессов в вертикальных скважинах и противоречил ранним заключениям о том, что эффект вращения трубы значителен лишь при ламинарном режиме течения, но не существенен в условиях турбулентного переноса импульса.

Здесь весьма важно отметить, что данные численных исследований закрученных внутренних течений [15–17], а также соответствующих результатов настоящего библиографического обзора позволяют все же судить о заметных изменениях локальных и интегральных параметров гидродинамических процессов (например, рис. 1–4) в областях с подвижной стенкой внутренней трубы. В частности, на это указывают картины пространственных распределений поля локальных компонент вектора скорости и давления при вращении стенки трубы ($Ro=W/U_0=10$) и динамике потока несжимаемой каплевой жидкости при $Re=20$. Видно, что течение потока с вращением в проксимальной части ($x/R < 2,5$) способно формировать специфические эффекты с рециркуляционными зонами, препятствующими движению в аксиальном направлении. Это обстоятельство не следует игнорировать при моделировании процессов транспорта шлама в пристеночной части буровой колонны и стоит руководствоваться представлениями о возможностях моделей управлять конвективно-диффузионными процессами в средах с аномальной вязкостью и неоднородностью состава при более сложных сдвиговых течениях.

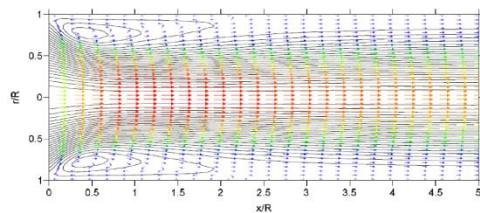


Рис. 1. Линии тока и векторное поле течения в трубе с вращающейся стенкой при значениях числа Рейнольдса $Re=20$ и Россби $Ro=10$

Fig. 1. Flow lines and vector flow field in a pipe with a rotating wall at $Re=20$, $Ro=10$

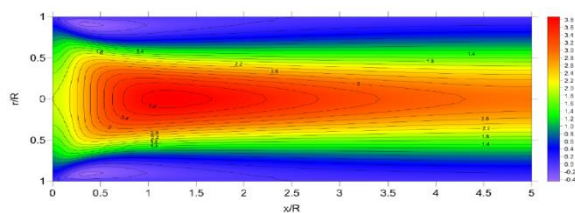


Рис. 2. Изолинии и поле осевой компоненты вектора скорости U/U_0 при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 2. Isolines and axial component field of the velocity vector U/U_0 at $Re=20$, $Ro=10$

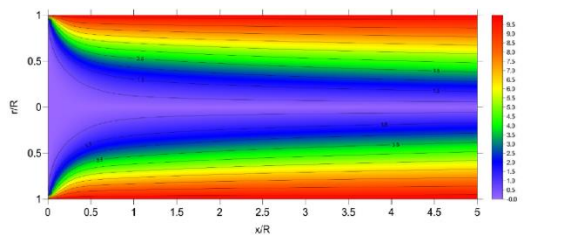


Рис. 3. Изолинии и поле тангенциальной компоненты вектора скорости W/U_0 при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 3. Isolines and tangential component field of the velocity vector W/U_0 at $Re=20$, $Ro=10$

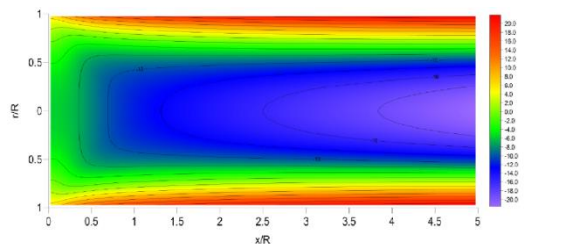


Рис. 4. Изолинии и поле давления $P/(U_0^2 \rho)$ при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 4. Isolines and pressure field $P/(U_0^2 \rho)$ at $Re=20$, $Ro=10$

Видно, что рассматриваемые вопросы требуют детального анализа и составляют предмет для перспективных приложений, поскольку мнение П. Томпсона и соавторов [13] не подтверждают и отдельные результаты из месторождений, где многократно наблюдался эффект значительного влияния вращения трубы на транспортировку шлама в наклонных скважинах. На практике этот процесс объясняют следующими механизмами. С увеличением угла наклона тангенциальное движение буровой трубы способно разрушить слой шлама в скважине. При этом частицы получа-

ют дополнительный импульс, диффундируют и мигрируют в жидкости, значительно повышая эффективность всего процесса очистки. К сожалению, большинство авторов не придавали этому эффекту должного внимания. Более того, моделирование вращения представляет нетривиальную задачу и требует качественного нового уровня описания гидродинамики вязких сред с неоднородной анизотропной структурой [15–17]. Заметим, что в настоящее время появились исследования, поддерживающие эту точку зрения (например, Б. Панг и др. [18], А. Буш и др. [19]).

Исследования С. Окранджи и соавторов [20] фокусировались на деталях процесса транспорта шламов в наклонных скважинах, использующих аномально вязкие среды и позволяющих определить влияние реологических свойств и параметров на очистку в рамках процессов, реализуемых на той же экспериментальной установке, что была использована Томреном и соавторами [13]. В ходе исследований С. Окранджи и соавторов [20] получены результаты, значительно отличающиеся от выводов П. Томрена и соавторов, более совпадающие с ранними исследованиями. Томрен и соавторы утверждали, что турбулентный режим течения для транспортировки шламов более эффективен в сравнении с ламинарным режимом течения при очистке скважины. Но, С. Окранджи и соавторы [20] заметили, что это справедливо только при углах наклона больше 55° . В скважинах с углами меньше 55° именно ламинарный режим течения создает технологические условия для эффективной очистки скважины.

Физику этого процесса можно объяснить подобно тому, что и наблюдали П. Томрен и соавторы. Так, при углах наклона более 40° появляются тенденции к образованию слоя шламов. На первой фазе этот слой был неподвижным и раствор обтекал его тяжелые фракции в условиях, характерных для ламинарного режима. Так как частицы шлама в пристеночной зоне течения слабо инерционны, они интенсивно осаждаются и группируются на неподвижном слое. В условиях турбулентного режима профиль аксиальной компоненты вектора скорости более заполненный в пристеночной области пограничного слоя из-за высоких значений турбулентной диффузии. Интенсивное перемешивание препятствует накоплению частиц у стенки и образованию слоя шлама. С другой стороны, С. Окранджи и соавторы [20] заметили, что турбулентное течение до определенной степени даже разрушает этот слой и, вследствие этих причин, является более эффективным для очистки, чем при ламинарном потоке в углах наклонности, способствующих образованию слоя шламов. В работе С. Окранджи и соавторов [20] нашли подтверждение результаты других авторов, заметившие, что предел текучести является самым важным реологическим параметром для транспорта шламов. Но с переходом к турбулентному потоку эффект влияния этого параметра значительно ослабевает. Поэтому с точки зрения очистки шламов самыми эффективными жидкостями следует считать псевдопластические с высокими пределами текучести.

Различия в оценках результатов данных работ, полученных при использовании одной установки, можно объяснить разными способами определения перехода к турбулентности для неньютоновских жидкостей. Этот вопрос является предметом современного исследования. Например, поскольку П. Томрен и соавторы [13] не сообщают детали своего метода определения критической скорости, можно допустить, что в [13] на самом деле использовали ньютоновскую жидкость подобно другим исследователям. Некоторую определенность в этом вопросе добавляют сведения работы [20], дающие представления об определении критической скорости по эмпирическому уравнению вида (12):

$$V_c = \left[\frac{6464(12^n k)}{(1+3n)^2 \left(\frac{1}{2+n}\right)^{(2+n)(1+n)} 2,79 \rho L \left(\frac{ID-OD}{12}\right)^n} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (12)$$

Здесь n, k – параметры уравнения степенного закона (9), ρ, L – плотность жидкости и длина участка; OD, ID – внешний и внутренний диаметры трубы соответственно.

Теоретическое исследование А. Гавине и соавторов [21] фокусировалось на проблемах разработки модели, предсказывающей протяженность слоя шламов. Однако модель оказалась труднореализуема в практических условиях функционирования специального оборудования в силу того, что имела параметры, недоступные для изменения на месторождении: эксцентричность, трение между частицами, межфазное натяжение и др. Все это составляет предмет дополнительного изучения задачи транспорта шламов на базе анализа механических сил, действующих на частицы. На наш взгляд, это направление и соответствующие экспериментальные результаты весьма перспективны для уяснения характера рассматриваемых проблем, но в рамках данной статьи детально не анализировались.

М. Мартин и соавторы [22] разработали очень простую критериальную полуэмпирическую связь прогноза минимальной скорости, необходимой для эффективной очистки скважины, в условиях угла наклона скважины меньше 45° следующего вида (13):

$$V_{\min} = \left[\frac{C[(\rho_s - \rho_l)g\mu]^{1/2}}{\rho_l} \right]^{2/3}, \quad (13)$$

где C – коэффициент, зависящий от угла наклона и вязкости, определяемый экспериментально. Стоит отметить, что в процессе выполнения экспериментов в лаборатории и на месторождениях также установлено: участок скважин в диапазоне изменений углов наклона порядка 30 – 60° является самым проблематичным для очистки. Это объясняется тем, что при этих углах образуемый слой шлама весьма неустойчив.

М. Зибергер и соавторы [23] анализировали влияние изменений свойств растворов с нефтяным основанием на интенсивность очистки шламов в наклонных скважинах. Такие растворы очень широко поль-

зуются при бурении участков скважин, проходящих через продуктивный пласт, поскольку, в отличие от обычных растворов на основе воды, они не наносят вред продуктивному пласту. Обнаружилось, что такие растворы крайне неэффективны в задачах транспорта шламов, несмотря на анализ изменений их реологических свойств, режимов и скорости потока. Установлено, что даже при скоростях потока выше 220 ft/min (1,12 м/с), пределах текучести выше 22 Па проблемы с очисткой скважин ещё сохранялись и неоднократно создавали угрозу ее потери. Заметим, что это заключение достаточно известно. Так, ранее У. Нанс [24] рекомендовал не использовать эти растворы при бурении участков с диаметром выше 12 дюймов и наклоном выше 30°.

М. Зибергер, проводя ряд экспериментов, связывал причину этого явления со следующими процессами: 1) при повышении температуры растворы на масляной основе очень быстро и интенсивно теряют нелинейность в своих реологических связях и становятся менее вязкими; 2) снижение вязкости характерно и для высоких скоростей деформаций. Из работ П. Томрена и С. Окранджи также известно, что жидкости с низкой вязкостью очень плохо очищают скважину, несмотря на попытки увеличения скорости потока и его режима течения. В настоящее время из-за техногенных угроз окружающей среде гораздо реже используют растворы на нефтяной основе. Но результаты этих исследований подчеркивают, что подобные явления могут присутствовать при использовании обычных растворов, т. к. исчезает нелинейность в реологических свойствах при забое и этим можно объяснить существующие погрешности при сравнении результатов расчетов и данных опыта по очистке скважин. К сожалению, эти вопросы также еще недостаточно изучены, еще ждут своего решения и могут составить предмет для дальнейшего исследования.

Выявлению особенностей, определяющих расхождение в результатах ранних экспериментальных исследований, посвященных формированию условий оптимального режима для транспорта жидкости и очистки скважины, посвящена работа [25], выполненная на оборудовании университета Хериот Ватт, Шотландия. В рамках исследований по определению характерного минимального значения скорости, необходимого для полной и эффективной очистки кольцевого пространства, показано [25], что существуют два специфических механизма транспорта шламов в наклонных скважинах. *Первый* из них был выявлен в ранних исследованиях и заключался в том, что отдельные частицы, находящиеся в составе слоя шлама и испытывая на себе действие подъемных сил, скользили по слою шламов. *Второй* отличался тем, что по мере развития условий процесса и увеличения скорости потока эти частицы опять приходили во взвешенное состояние в жидкости и затем двигались вместе с ней вверх. В обоих случаях вращение буровой трубы отличалось тем, что приводило к уменьшению значения минимальной скорости потока, требуемой для очистки, а рост размера частиц приводил к увеличению ее соответствующего значения.

Наличие этих *двух механизмов* транспорта шламов вполне объясняет картину того, что отдельные авторы считали условия турбулентного потока более предпочтительными для очистки, другие, наоборот, связывали это с режимом ламинарного течения. Причиной этого различия может быть то, что такие эксперименты сильно отличаются, т. к. в них фиксируются условия определения режима течения жидкости, но пренебрегается оценками режима течения частиц и изменения структуры и состава смеси.

Исследование этих вопросов нашло продолжение в работе Дж. Педен и соавторов [26], где была использована концепция установления значений минимальной транспортной скорости (разработанная в Дж. Форд и соавторы [25]), посвященная изучению роли отдельных параметров в процессе транспортировки выработки по двухслойной модели. Минимальная транспортная скорость определялась как скорость, при которой движутся все частицы шлама. Это более совершенная в физическом смысле концепция минимальной скорости в сравнении тем положением, по которому ее следует связывать с понятием скорости проскальзывания (что справедливо только для вертикальных скважин) или со скоростью, характерной для переноса частиц шлама (в которой не учитываются различия в скоростях между взвешенными частицами и слоями частиц).

Ценными для приложений выступают данные ранних исследований, представленных Ю. Лу [27], в которых приводятся следующие полуэмпирические уравнения для определения этой минимальной скорости переноса, хорошо зарекомендовавшие себя (по данным [26]) в качественном и количественном отношении в прогнозе реальных процессов. Так, для частиц во взвешенном состоянии имеем (14):

$$\frac{V^2}{d_s \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \sin \varphi} = n_1 \left(\frac{d_s V \rho_f}{\mu} \right)^{n_2} \left(\frac{d_s}{b_{ca}} \right)^{n_3}. \quad (14)$$

Для частиц, находящихся в слоях шлама (15):

$$\begin{aligned} \frac{V^2}{d_s g \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) (\cos \varphi - f_s \sin \varphi)} = \\ = m_1 \left(\frac{d_s V \rho_f}{\mu} \right)^{m_2} \left(\frac{d_s}{b_{ea}} \right)^{m_3}. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь n_i, m_i ($i = \overline{1,3}$) – коэффициенты опыта; φ – угол наклона; b_{ea} – расстояние между стенками внешней и внутренней труб; f_s – коэффициент трения между частицами и стенками труб.

При проверке приведенных выше уравнений было установлено, что очистка отверстия сильно зависит от режима потока. Причем турбулентность дает даже больший эффект, чем особенности поведения реологических свойств потока. Также установлено, что мелкие частицы лучше транспортируются жидкостями с низкой вязкостью, тогда как крупные частицы

эффективнее движутся в высоковязком потоке. Относительно эффекта вращения трубы отмечено, что он проявляется лишь в небольших кольцевых пространствах. Все это способствует пониманию того, что более ранние исследования очистки вертикальных участков скважин с большими значениями кольцевого зазора приводили к заключению об отсутствии влияния крутки стенки трубы на транспорт шлама.

Т. Беккер и соавторы [28] провели серию из 180 экспериментов на том же оборудовании, которое использовали П. Томрен и С. Окранджи для своих экспериментов, в попытке уяснить особенности изменений реологических свойств жидкости на процесс транспорта шлама. Было установлено, что реология способна оказывать наибольшее влияние при низких скоростях потока в скважинах по вертикальным и близким к вертикальным ориентациям ее ствола. В таких условиях наиболее важным для управления реологическим параметром выступает предел текучести. Т. Беккер и соавторы [28] предположили, что критическим параметром является отношение предела текучести к пластической вязкости, которое для степенных жидкостей, согласно Дж. Савинса [29], можно представить в виде (16):

$$\frac{YP}{PV} = \frac{2 - 2^n}{2^n - 1}, \quad (16)$$

где YP обозначает предел текучести; PV – пластическая вязкость; n – показатель в степенном законе (9).

Как указывалось ранее, при почти вертикальных углах и низких кольцевых скоростях более высокие значения этого отношения приводят к лучшей очистке отверстия. Также в [28] подтверждены ранее сделанные выводы, что ламинарный поток предпочтителен при углах от 0 до 45°, а при больших углах (особенно выше 60°) условия турбулентного потока следует считать более эффективными. Кроме того, также подтвержден тот факт, что в условиях турбулентного потока реология мало влияет на транспорт частиц выработки. И чтобы определить режим потока, авторы использовали следующее уравнение [30] типа (17), считая критическим значение числа Рейнольдса порядка 2200 для существования ламинарного потока:

$$Re = \frac{2,79[(OD - ID)/12]^n V^{2-n} \rho_f}{12^n K_a}, \quad (17)$$

где K_a – индекс согласованности степенного закона с поправкой на кольцевой поток.

Стоит отметить, что Т. Сифферман и Т. Беккер [31] провели один из крупнейших качественных экспериментов в исследовании проблем транспорта шлама, для завершения которого потребовалось четыре года, и изучили влияние следующих важных для практики 10 переменных: кольцевая скорость; плотность бурового раствора; реология; тип бурового раствора (на основе нефти или на водной основе); размер частиц; скорость бурения; скорость вращения буровой трубы; эксцентриситет буровой трубы; зазор в кольцевом пространстве и угол наклона скважины (подчеркнем, что учитывались только углы выше 45°).

Все это ориентировано на процессы в горизонтальных, а не в вертикальных и близких к вертикальным скважинах. Обнаружено, что скорость течения бурового раствора была единственным и наиболее важным фактором в транспортировке шлама, за которым следовали плотность бурового раствора, скорость вращения и угол наклона, в то время как эксцентриситет буровой колонны и реология бурового раствора оказывали незначительное влияние.

Эффект вращения и транспорт шлама

Несмотря на то, что вопрос о влиянии режима потока был более или менее хорошо изучен к середине 1990-х гг. (при заключениях ламинарный поток предпочтителен при углах наклона скважин ниже 45°, турбулентный поток – при углах выше 60°), роль вращения буровой трубы все еще оставалась предметом анализа, так как результаты лабораторных исследований отмечали его незначительность, в то время как результаты на месторождениях позволяли утверждать, что, на самом деле, это очень заметный эффект со значительным влиянием на очистку скважины. Поэтому Р. Санчес и соавторы [32] использовали протяженную (100 футов, 4 1/2 дюйма буровая труба в 8" обсадной колонне) испытательную секцию для исследования влияния скорости вращения. Было выполнено более 600 испытаний со скоростью вращения от 0 до 175 об/мин, а также с изменением угла наклона скважины (40°, 65°, 80° и 90°), реологии бурового раствора, размера шлама и расхода бурового раствора. Результаты показали, что вращение буровой трубы дает очень существенный эффект, особенно при транспортировке небольших частиц. Весьма важно отметить, что данные результаты получены в предположении наличия орбитального вращения внутренней трубы, поэтому и обнаружено расхождение с другими результатами, полученными при анализе частного эффекта, обусловленного лишь коаксиальным вращением. Вращательное движение буровой трубы интенсифицирует процесс транспорта, захватывая больше частиц. Это приводит к снижению концентрации шлама (на 80 %) при меньших кольцевых скоростях и при более высоких углах наклона. Однако, его влияние снижается с увеличением кольцевой скорости и уменьшением наклона скважины. Но, оно никогда не становится пренебрежимо малым, даже при самом низком угле наклона в 40°.

Т. Ларсен и соавторы [33] предприняли попытку построения эмпирической модели для прогноза процесса, обеспечивающего условия транспорта шлама с минимальной кольцевой скоростью, необходимой для предотвращения развития эффектов *седиментации* частиц шлама в плотных слабо инерционных слоях, и следящего за эволюцией диффузионной структуры частиц шлама в кольцевом пространстве в условиях, если локальная скорость потока становится ниже этого характерного значения. Их уравнение справедливо только для неподвижных труб (при допущении эксцентриситета межтрубного пространства и расположения внутренней трубы на поверхности нижней стенки колонны) при углах выше 55°. В [33] исполь-

зовали рабочую транспортную среду с параметрами Бингамовской жидкости. Критическая скорость транспортировки соответствовала условиям шлама, находящегося во взвешенном состоянии, для которых наиболее важным фактором является расчет скорости скольжения. Скорость скольжения определяется функциональной связью от реофизических свойств, первоначально предложенной для расчета в вертикальных скважинах, но путем введения экспериментальных поправочных коэффициентов адаптирована на учет условий наклона и веса бурового раствора в виде (18), (19):

$$V_{slip} = 0,00516\mu_a + 3,006, \text{ если } \mu_a < 53 \text{ сП;} \quad (18)$$

$$V_{slip} = 0,02554(\mu_a - 53) + 3,28, \text{ если } \mu_a \geq 53 \text{ сП.} \quad (19)$$

Заметим, что $[V_{slip}]$ – ft/s. Вместе с тем авторами была проведена кропотливая работа по расширению возможностей применения критериальных связей путем введения отдельных эмпирических поправочных коэффициентов (например, на учет наклона скважины, веса бурового раствора, размера частиц и т. п.), имеющих вид (20)–(22):

- коэффициент учета веса бурового раствора:

$$C_{MW} = 1 - 0,0333(\rho_f - 8,7), \text{ при } \rho_f < 8,7, \text{ lb/gal;} \\ C_{MW} = 1, \text{ при } \rho_f \geq 8,7, \text{ lb/gal} \quad (20)$$

- коэффициент учета угла наклона:

$$C_{inc} = 0,0342\theta - 0,000233\theta^2, \quad (21)$$

- коэффициент учета размера частиц шлама:

$$C_{size} = -1,04D_{50} + 1,286. \quad (22)$$

Здесь D_{50} – средний размер частиц шлама, [in]. Причем, если расход насоса (Q_{pump}) меньше расхода (Q_{crit}), необходимого для обеспечения критической скорости, предлагается рассчитывать концентрацию частиц шлама (\bar{C}), входящих в слой шламов, с помощью следующего уравнения (23):

$$\bar{C} = 100 \left(1 - \frac{Q_{pump}}{Q_{crit}} \right) (1 - \varphi), \quad (23)$$

где φ – пористость слоя шламов.

Стоит отметить, что проблема реализации соотношений Ларсена (18)–(23) на практике состоит в том, что они не в полной мере отвечают процессам, сопровождающим эрозию и разрушение новых формирующихся слоев шламов в ситуациях останова/запуска специального бурового оборудования. Кроме того, следует учитывать, что при отсутствии работы насосов частицы оседают и формируют слой шламов, а это заставляет искать решения эффективной очистки, используя другие подходы, не ограничиваясь только представлениями о минимальной скорости. Учитывая это, А. Мартинс с соавторами [34] разработали корреляцию для прогнозирования высоты слоя выработки после циркуляции в течение определенного периода времени. Опыты показывают, что значение этого параметра экспоненциально уменьшается со временем и может описываться связью типа (24):

$$C_t = C_R + Ae^{(-t/\tau)}, \quad (24)$$

где C_R – концентрация частиц шлама, соответствующая условиям процесса достаточно большого временного периода; A – разрушаемая концентрация частиц шлама, τ – характерное время технологического процесса, определяемое в виде (25):

$$\tau = \sqrt{a(RPM + b)^c Q^d D / 8}, \quad (25)$$

где RPM – это скорость вращения; Q – расход насоса; D – диаметр скважины; a, b, c, d – экспериментальные параметры. Здесь важно отметить, так как авторы не позволяли трубе вращаться орбитально, уравнение (25) применимо только в ситуациях $RPM=0$. Поэтому целесообразна работа по построению связей, учитывающих орбитальное движение трубы, определению C_R с учетом факта, что их сумма представляет значение суммарной концентрации шлама, произведенного во время бурения. Выше отмечалось, что орбитальное движение бурильной трубы оказывает существенное влияние на процесс транспортировки шлама и его коаксиальное движение становится более эффективным в сравнении с заключениями предыдущих исследований.

Так, уяснение деталей этого процесса приводят З. Филиппа и соавторов [35] к заключению, что вихри Тейлора, генерируемые вращательными эффектами в кольцевом пространстве во время бурения, могут интенсифицировать процесс очистки от шлама. Результаты исследований отмечают, что вихри Тейлора (схематично представленные на рис. 5) образуются в условиях, когда локальное число Тейлора (Ta , определенное в виде (26)) превышает критическое значение ($Ta_{cr}=3414$) [36]:

$$Ta = 4(\rho\omega / \mu)^2 (b^4 OD^2 / (ID^2 - OD^2)), \quad (26)$$

где ω – угловая скорость, (рад/с); b – ширина кольцевого зазора, м; ID, OD – внутренний и внешний диаметры труб.

Заметим, что одними из первых результатов, затрагивающих проблему оценки влияния этих вихрей на транспорт шламов, были данные исследований Т. Локетта и соавторы [37]. Детализация исследований, выполненная в [35], позволила утверждать, что в рабочем диапазоне скоростей вращения стенки в процессе бурения аксиальный перенос импульса препятствует вихреобразованию и структура течения с вихревыми особенностями формируется только при $Re < 1000$. В [35] отмечено, что для процесса подъема и захвата частиц вихревым потоком важно значение показателя степенного реологического закона n в (9). Однако увеличение этого параметра приведет также к снижению влияния свойств жидкости (в смысле «разжижения при сдвиге»), что нежелательно, поскольку это способно интенсифицировать нагрузки на пласт, а также специальное оборудование для бурения. В указанном смысле, несмотря на то, что результаты [35] имеют относительно низкую практическую ценность, все же их следует привлекать к уяснению особенностей и противоречий, отмеченных в опубликованных более ранних работах другими исследова-

телями, в отношении роли коаксиального вращения труб в транспорте частиц шлама.

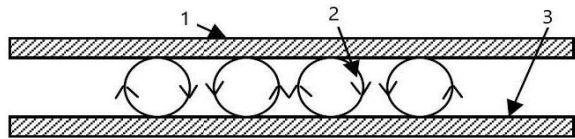


Рис. 5. Вихри Тейлора, образующиеся в кольцевом пространстве горизонтальных участков скважин [35]: 1 – внутренняя труба; 2 – вихри; 3 – внешняя труба

Fig. 5. Taylor vortices formed in the annular space [35]: 1 – inner pipe; 2 – eddies; 3 – outer pipe

Особенности новых технологий и детали их моделирования в процессах бурения

С 2000-х гг. бурение на депрессии стало новой технологией бурения истощенных пластов. Этот тип бурения использует легкую пену в качестве бурового раствора. А. Мартинс и соавторы [38] исследовали свойства пены применительно к транспортировке шлама с использованием новой испытательной секции экспериментальной установки, разработанной Petrobras, которая способна моделировать скважинные условия. Обращение к пенам обусловлено тем, что для них характерна *слабосжимаемость*. Незначительное число исследований, в которых пены используются в качестве рабочей среды, объясняется отсутствием специального оборудования для проведения опытов при высоких давлениях и температурных напорах, приводящих к существенному изменению реологических свойств среды. Кроме того, ранее выполненные исследования показали, что пены действительно очень подходят для транспортировки частиц шлама, поскольку способны удерживать частицы во взвешенном состоянии даже в моменты выключения и последующего простоя оборудования (насосов). Однако для того, чтобы это имело место, соотношение концентрации газа и жидкости (известное как качество пены) в данной смеси должно составлять 94–98 % [39]. Поддержание этого соотношения чрезвычайно сложно в полевых условиях, и, естественно, при бурении пеной также образуется слой шлама. Следовательно, как и в случае с обычными буровыми растворами, важным для пенопластов является вопрос о готовности и способности эффективно разрушать слой осаждаемых частиц. Отметим, что в [38] предлагается эмпирическое уравнение для эрозии этого слоя в виде (27):

$$\frac{h}{OD} = a - b\alpha^c, \quad (27)$$

где h/OD – отношение высоты слоя шлама к диаметру скважины; α – коэффициент качества пены; a, b, c – эмпирические коэффициенты. По [40] можно представить реологические свойства пены как жидкости со степенным законом типа (7) с параметрами вида (28), (29):

$$n = 0,8242 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{0,5164}; \quad (28)$$

$$K = 0,0813 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{1,5909}. \quad (29)$$

Тогда можно написать (27) в виде (30), (31):

$$\frac{h}{OD} = a - b \text{Re}^c n^d; \quad (30)$$

$$\text{Re} = \frac{8OD^n V^{2-n} \rho_f}{K \left(2 \frac{(3n-1)}{n} \right)^n}. \quad (31)$$

Подчеркнем, что связи (30), (31) сформулированы для случая с неподвижной стенкой внутренней трубы и при отсутствии в составе смеси капельной жидкой фазы, а также фактора ее эксцентricности.

В дополнение к вопросу о бурении на депрессии отметим, что в 2000-х гг. также весьма популярной была технология бурения с гибкими трубами, включавшая специфические проблемы с точки зрения очистки скважин в силу того, что в небольших кольцевых пространствах скорости течения ограничены. Кроме того, конструктивные особенности оборудования для данного бурения исключают наличие вращательной подвижности стенки трубы. В таких условиях для разрушения образующегося слоя шлама эффективна гидравлическая эрозия. Поэтому важно представлять, как долго и с помощью каких параметров потока жидкости этого можно добиться. С. Уокер и Дж. Ли [41], выполнив более 700 измерений процесса с переменными параметрами жидкости и размеров частиц шлама, обнаружили (подобно ранним исследованиям Мартинса), что функциональная связь параметров, ответственных за удаление шлама с течением времени, носит экспоненциальный характер. Причем наиболее важными факторами управления очисткой наклонных скважин являются скорость и вязкость рабочей жидкости. Установлено, что использование жидкостей с низкой вязкостью при перекачке с высокими скоростями в узких областях кольцевого зазора весьма продуктивно для очистки сечений специального бурового оборудования.

Последующие исследования Дж. Ли [42] имели своей целью выяснение сути комплексных проблем, возникающих при объединении технологий бурения с гибкими трубами и бурением на депрессии. Причем вместо пены использовалась воздушно-капельно-жидкостная (аэрированная) смесь. Обширные исследования позволили утверждать, что в случае трехфазного потока без вращения трубы: 1) существует характерная кольцевая скорость, ниже которой транспорт частиц шлама весьма затруднен по отношению к рассматриваемым условиям процесса (но отличного от случая транспорта с жидкими псевдопластичными растворами); 2) чтобы иметь какую-либо несущую способность, объемная доля жидких фаз должна составлять не менее 50 % (здесь уместно сравнение соответствующих процессов с пенами, показывающими,

что эта объемная доля должна быть лишь менее 8 %):
3) эрозия частиц шлама соответствует экспоненциальной зависимости, а время очистки может быть в виде (32):

$$t = \frac{V_0}{C_0 Q} \ln \left(\frac{V_0}{V_t} \right), \quad (32)$$

где V_0 – исходный объем частиц шлама в затрубном пространстве (м^3); V_t – количество частиц после циркуляции в течение времени t , [мин] при скорости потока с расходом Q , [$\text{м}^3/\text{мин}$]; C_0 – исходная концентрация частиц шлама в затрубном пространстве. Следует отметить, что (32) – это общее уравнение, и необходима работа по введению поправочных коэффициентов для учета свойств и режимных параметров бурового раствора, особенностей шлама, специфики потока и деталей геометрии. Указанное подчеркивает, что уточнение формы зависимости (32) может составить предмет перспективных исследований по очистке областей от шлама.

С. Наганава и соавторы [43] также исследовали процесс транспортировки шлама с использованием азрированного бурового раствора. Обнаружено, что для того чтобы шлам не загромождал сечение и не образовывался на границах кольцевого пространства, концентрация частиц в затрубной области должна быть менее 4 %. Этот факт следует считать подтверждением правила Пиготта, сформулированного еще 50 лет назад, что эффективная очистка отвечает условиям при концентрации шлама в затрубном пространстве в объеме меньше 5 %. Однако в [43] установлено, что для предотвращения повышения концентрации частиц в затрубном пространстве (выше 4–5 %-го критического уровня) необходимы достаточно высокие кольцевые скорости. И хотя добавление воздуха в систему несколько снизило это требование, очистку в горизонтальных сечениях определяет минимальная необходимая кольцевая скорость порядка 1,5 м/с. Все же эти скорости определенно высоки, но возможны на небольших участках скважины (например, кольцевая скорость 1,5 м/с будет соответствовать 570 галлонам в минуту в 8½-дюймовой скважине с пятидюймовыми буровыми трубами). Однако на других размерах отверстий их будет очень трудно получить (например, в 12,25-дюймовой скважине с пятидюймовыми буровыми трубами потребуются скорости потока порядка 1500 gal/min). Все это еще раз подтверждает тот факт, что практически невозможно предотвратить образование слоя частиц шлама в кольцевом пространстве в горизонтальных и близких к горизонтальным стволам скважин. В таких условиях решение проблемы очистки скважин заключается не в предотвращении образования слоя шлама, а в создании эффектов и механизмов для его быстрой и эффективной эрозии после бурения.

Далее П. Виейра и др. [44] также занимались исследованием азрированных систем, что позволило утверждать, что несмотря на то, что частицы транспортируются только жидкой фазой, кольцевая скорость жидкой фазы не является единственным и важ-

ным параметром их транспортировки, в данном процессе заметно влияние суммарной скорости потока обеих фаз. Это означает, что если достижение требуемых скоростей жидкости для предотвращения образования слоев шлама невозможно, эти требования можно скорректировать путем увеличения скорости воздушного потока. Однако следует помнить, что увеличение скорости воздушного потока приведет к снижению значения эффективной плотности и, следовательно, это не всегда практически целесообразно для рассматриваемого процесса. Кроме того, в [44] предлагается в практику исследований корреляционная связь для горизонтальных и квазигоризонтальных скважин, которая предсказывает требуемую скорость воздушного потока при данной скорости потока жидкости, препятствующей механизмам образования слоя шлама, в виде (33):

$$Q_g \geq \frac{11,5752}{B} \ln \left(\frac{A(ID^2 - OD^2)}{0,4085Q_l} \right) (ID^2 - OD^2) \frac{P_{BH}}{T_{BH}}, \quad (33)$$

где Q_g – расход газа, $\text{ft}^3/\text{мин}$; Q_l – расход жидкости, gal/m; ID и OD – диаметры наружной и внутренней труб, [in]; P_{BH} – забойное давление, lbf/in^2 ; T_{BH} – забойная температура, °Ra; A , B – экспериментальные коэффициенты.

Р. Авила и соавторы [45] продолжали исследовать несущую способность многофазных систем, но они ограничивали свои исследования углами с отклонением от горизонта порядка 30°, 45°, 60°, а также учитывали орбитальное движение буровой трубы. Результаты позволили сформулировать корреляционное уравнение по учету орбитального вращения буровой трубы, приводящего к снижению скорости потока газа, необходимой для поддержания концентрации частиц шлама в затрубном пространстве в объеме меньше 1 %. Одним из главных результатов было подтверждение факта, что орбитальное вращательное движение влияет на транспорт шлама гораздо больше, чем режим соответствующего прямоочного потока. Отмечено, что добавление газа в систему снизило требования к значению скорости потока для жидкой фазы. И это также подтверждает ранее полученные результаты П. Виейра и др. [44].

М. Дан и соавторы [46] приняли во внимание фактор, который до сих пор игнорировался исследователями. Они заметили, что процесс очистки отверстий неодинаков для частиц произвольного размера и что теоретические модели, которые составляют основу многих приложений для бурения, не учитывают это обстоятельство. Последнее приводит к большим ошибкам в оценках деталей процесса. Анализ возможностей отдельных таких моделей, успешных при прогнозе транспорта частиц крупных размеров, показал существенное расхождение с данными опытов (до 80 %) при моделировании мелких частиц. Такие частицы трудно удалить из скважины. Они имеют наибольшую склонность к седиментации, коагуляции в слое шлама и нуждаются в детальном изучении. Стоит отметить, что поведение мелких частиц в слое неясно. Дан и др. в своих экспериментах использова-

ли только частицы трех размеров, самый мелкий из которых соответствовал 0,45 мм. Однако стандартное определение песка, основанное на ISO-14688, имеет диаметр от 0,063 до 2 мм, и необходимы дальнейшие исследования, чтобы выяснить, насколько изменение среднего диаметра частиц влияет на процесс очистки отверстия.

М. Озбайоглу и др. [47] вернулись к вопросу корректного прогноза критических значений кольцевой скорости течения и режима, препятствующего процессам образования слоя шламов. Исследование позволило выявить десять факторов, влияющих на эффективность очистки пространства, а на основе теории подобия сформулировать семь безразмерных комбинаций, составленных из параметров: концентрация частиц выработки (самостоятельно влияющая на транспортировку шлама); среднемассовая скорость кольцевого потока; угол наклона; гидравлический диаметр; плотности жидкости и частиц шлама; геометрия частиц; вязкость; скорость вращения трубы и сила тяжести. В рамках безразмерного анализа сформулированы критериальные связи прогноза роста высоты слоя шлама и значений критической кольцевой скорости. Заметим, что данная зависимость в виде (34) имеет отдельные недостатки, влияющие на точность прогноза: 1) связь (34) сформулирована по данным измерений в тестовых участках с ограниченной продольной длиной. Заметим, что полномасштабные процессы транспорта шлама на оборудовании университета Тулса, США, соответствуют длине порядка 100 ft. Это исключает влияние возмущений на входе на характеристики процесса. В сравнении с этим, в [47] длина тестовой секции не превышает 15...40 ft, что заставляет учитывать конвективно-диффузионные нелинейные процессы в изменении структуры потока и вносить погрешности к значениям определяемых параметров пространственной задачи исследования; 2) внутренняя труба размещена эксцентрично и не способна к вращению; 3) частицы, использованные в эксперименте, имеют диаметр 3 мм. Это приносит неопределенность учета частиц более мелкого состава, вызывающих увеличение слоя шлама. Тем не менее предлагаемые ниже зависимости (34), (35) ценны для практики, и вид их может быть уточнен по мере детализации явлений, определяющих транспорт шлама:

$$\frac{A_{bed}}{A_{well}} = 0,7524 \left[\left(\frac{\rho v (D_o - D_i)}{\mu} \right)^{-0,1023} \times \right. \\ \left. \times \theta^{0,34} \left(\frac{v^2}{D_o - D_i} \right)^{-0,2933} C_c^{0,2108} \right]; \quad (34)$$

$$v_{crit} = 3,9835 \left[\theta^{0,0378} D_o^{0,4686} \times \right. \\ \left. \times ROP^{0,2343} (D_o + D_i)^{-0,2343} \times \right. \\ \left. \times \mu^{0,1137} (D_o - D_i)^{-0,022} \rho^{-0,1137} \right], \quad (35)$$

где A_{bed} – площадь режущего слоя; A_{well} – поперечное сечение ствола скважины; ρ – плотность жидкости; v – кольцевая скорость; D_o – диаметр наружной трубы;

D_i – диаметр внутренней трубы; θ – угол наклона; C_c – концентрация частиц; ROP – механическая скорость проходки; μ – вязкость жидкости.

А. Гумати и Х. Такаши [48] исследовали несущую способность пен и установили, что она близка по реологическим свойствам к модели степенного закона. Это заключение способствовало разработке математической модели транспорта шлама и численному прогнозированию величины потерь давления в кольцевом пространстве для условий изотермического процесса. Результаты позволили установить, что в отличие от двухфазных систем пены фактически теряют свою несущую способность при увеличении кольцевой скорости. Физически это можно объяснить тем, что на самом деле пенопласты не транспортируют, а захватывают частицы шлама в силу своей высокой вязкости. И, являясь псевдопластичными жидкостями, они теряют свою вязкость в режимах при более высоких значениях кольцевых скоростей.

Новые технологии, инструментальный исследований и имитационное моделирование процесса очистки способствовали получению представлений об изменении поля давления на долоте в режиме реального времени. Практический опыт использования специального оборудования подтверждает, что это давление эквивалентно потерям давления в кольцевом пространстве. Поэтому разумно допустить, что оно опосредованно может быть связано с концентрацией шламов в затрубном пространстве. Это наводит на размышление, что в случае построения такой связи становится возможной оценка количества шламов в затрубном пространстве в режиме реального времени. Последнее составляет практическую ценность в вопросах выработки оптимальных решений по управлению оборудованием и составляет дополнительную современную проблему исследований процесса транспорта частиц шлама. Заметим, что М. Соргун и соавторы [49] получили очень интересные результаты в этой области исследований. Так, проведя более 700 испытаний, они получили ряд эмпирических уравнений, связывающих площадь слоя шламов с коэффициентом сопротивления трения Фаннинга для жидкостей с высокой и низкой вязкостью. Поскольку коэффициент сопротивления трения Фаннинга связан с падением давления соотношением (36):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{f \rho v^2}{21,1(D_o - D_i)}, \quad (36)$$

по величине падения давления на участке длины ΔL можно определить площадь слоя шламов в этой секции. Заметим, что в (36) все единицы измерения даны в американской системе единиц измерения, которая приемлема в бурении в большинстве стран мира, а давление в [lbf/in²], длина в [ft], плотность в [lb/gal], диаметры в [in], скорость в [ft/s]. Также следует иметь в виду, что в действительности это уравнение не вполне корректно, поскольку применимо только для небольшого участка прямой трубы, тогда как геометрия скважины включает в себя несколько изгибов и изменений в диаметре. Это означает, что в общей ве-

личине изменения поля давления следует учитывать локальные потери на трение из-за изменений поля скорости. Поэтому, если вместо одного датчика давления в долоте будет использоваться несколько, ориентированных на учет особенностей процесса в особых локальных зонах, этот метод будет адекватным реальным условиям.

М. Соргун [50] разработал оригинальное уравнение прогноза перепада поля давления с учетом изменений особенностей геометрии и углов отверстий (от 60 до 90°) и рекомендовал его в практику прикладных исследований в виде (37):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0,08 \left[\frac{A_{bed}}{A_{well}} + Re^{0,11} + +0,0007 Re R + C_c - 0,01\theta \right], \quad (37)$$

где A_{bed} и $A_{wellbore}$ – поперечные сечения режущего слоя и кольца; Re – число Рейнольдса, определенное по осевой скорости; C_c – концентрация шлама, поступающего в систему; θ – угол наклона от вертикали; $Re R$ – число Рейнольдса, определяемое по тангенциальной скорости следующим образом (38):

$$Re R = \frac{2,025 \rho \omega (D_o - D_i) D_i}{\mu}. \quad (38)$$

Заметим, что все величины в (38) соответствуют нефтепромысловым единицам измерений, описанных выше; ω – это угловая скорость вращения, об/мин; μ – эффективная вращательная вязкость, рассчитанная по (39) для степенных жидкостей [51]:

$$\mu = k \left(\frac{1}{n} \right)^n \xi \left(\frac{1}{\omega} \right)^{1-n}, \quad (39)$$

где k и n – коэффициенты степенного закона, ξ определяется в виде (40):

$$\xi = \left(\frac{D_o^2 - D_i^2}{D_o^2} \right) \left(\frac{15}{\pi} \right)^{1-n} \left(1 / \left(1 - \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^{\frac{2}{n}} \right) \right)^n. \quad (40)$$

В ходе экспериментов [50] установлено, что вращение трубы эффективно при условиях ее эксцентричности. Это подчеркивает, что значительное влияние на процесс оказывает подвижность стенки трубы при относительно небольших скоростях прямоочного движения потока. Отдельные результаты показывают [15–17], что это отвечает условиям течения с критерием Россби, $Ro = W/U \leq 3$. Указанные проблемы слабо изучены и составляют предмет перспективных исследований при эксплуатации и проектировании скважин.

Прогресс процедур численного моделирования

В последнее десятилетие вычислительные методы получили дополнительный импульс изучения рассматриваемых проблем вследствие расширения базы экспериментальных данных о деталях очистки оборудования, совершенствования гидродинамических моделей. В этом направлении яркими представляются результаты, например, С. Нагавана и соавторов [52],

которые построили численное решение по имеющейся математической модели, тестировали результаты на лабораторных экспериментах с целью уточнения коэффициентов модели, а затем применили модель для прогноза потерь давления при бурении в реальной скважине. Сравнение с фактическими полевыми данными показало, что, хотя модель правильно предсказывала гидродинамические тренды поведения поля скорости, фактические значения не совпадали с экспериментом. Это объясняется нестабильностью и обвалом стенок ствола скважины.

В работах Ф. Жанга [53, 54] численное моделирование позволило обобщить результаты в диаграммы, полезные для анализа процессов в полевых условиях при прогнозировании изменений объемной концентрации шлама в стволе скважины. В дальнейшем соотношение сведений по диаграммам и данным измерений указало на погрешность результатов (до 20 %) при анализе влияния на процесс следующих факторов: наклона скважины; изменений вязкости и плотности рабочей жидкости; плотности частиц шлама; скоростей бурения, вращения стенки и кольцевого потока. Детали результатов работ Жанга [53], Жанга и соавторов [54] иллюстрируют данные, представленные на рис. 6.

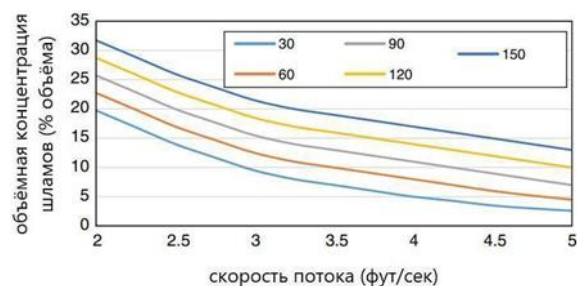


Рис. 6. Распределения полевых карт [54] об изменениях объемной концентрации шлама в зависимости от изменений скорости потока. Линии – углы наклонов от 45 до 50°, числа – скорости бурения, ft/h

Fig. 6. Field chart distributions [54] (the chart shown here is for inclinations from 45 to 50°). The numbers in the box represent drilling speed in feet per hour

Заметим, что при практическом использовании результаты рис. 6 должны быть скорректированы с использованием данных для поправочных коэффициентов для вращения буровой трубы, вязкости жидкости и плотности жидкости и частиц.

Также интересные результаты получены Б. Вернером [55]. Долгое время считалось, что растворы на нефтяной основе не вполне пригодны для практической очистки и уступают растворам на водной основе. Результаты на месторождении указывают на закономерности, которые не соответствуют этому предположению. Отмечено, что существуют различия в способности буровых растворов на масляной и водной основе к очистке. Данные [55] показывают, что несущая способность обеих жидкостей полностью зависит от их реологических свойств. Однако в способности разрушать слой шлама буровые растворы на масля-

ной основе имеют явное преимущество. Этот результат следует включить в предмет перспективных исследований.

Анализ библиографических исследований показывает, что одной из самых больших проблем при изучении процессов транспортировки шламов в затрубном пространстве является тот факт, что из-за непрозрачности большинства буровых растворов чрезвычайно трудно визуально наблюдать за самим процессом и можно собирать только интегральную информацию (например, данные изменений массовой скорости жидкости, объёмной концентрации шламов и т. д.). Однако существуют случаи, когда знание об изменениях локальных параметров весьма полезно, особенно для валидации и верификации методов, оптимизации математических и численных моделей. Решению этих проблем способствует использование карбопола, который представляет собой прозрачную жидкость со степенным реологическим законом. Однако приготовить раствор карбопола, который был бы реологически идентичен определенной буровой жидкости в широком диапазоне скоростей сдвига чрезвычайно сложно. Из [55] известно, что две жидкости с одинаковыми реологическими профилями не обязательно ведут себя одинаково в экспериментах по очистке отверстий из-за различий в коэффициентах сопротивления трения. Таким образом, карбопольный метод неадекватен в исследованиях процессов транспорта шлама. Однако можно отметить, что существует технология, успешно использованная при изучении многофазных потоков в трубах и резервуарах и в последнее время рекомендуемая для анализа транспортировки частиц шлама. Это методика, известная как томография с электрическим сопротивлением, является относительно недорогой и не имеет ни одного из недостатков карбопольной методики. Так, например, М. Курейши и соавторы [56], А. Захид и соавторы [57] использовали эту технику для изучения трехфазного потока воздуха, воды и стеклянных шариков в кольцевом пространстве (на рис. 7 показано изображение данных структуры поперечного сечения трубы, полученное этим способом).

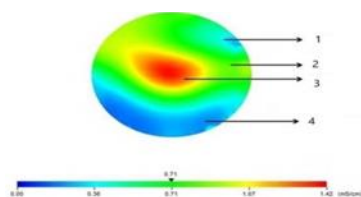


Рис. 7. Изображение томографии с электрическим сопротивлением, показывающее поперечное сечение кольцевого пространства, содержащего три разные фазы с разной электропроводностью, представленной разными цветами (по данным Курейши [56]: 1 – воздух; 2 – вода; 3 – труба; 4 – стеклянные частицы)

Fig. 7. ERT image showing the cross section of an annular space containing three different phases with different electrical conductivities represented by different colors. Data from M.F. Qureishi [56]: 1 – air; 2 – water; 3 – tube; 4 – glass particles

Отметим, что поле рассчитанных значений концентраций отвечает частям площади поперечного сечения (с пикселями разного цвета), а индивидуальный цвет отвечает различным и соответствующим значениям электрического сопротивления и, следовательно, характеризует разное вещество, которое подлежит очистке.

Заключение

Тенденции, возможности и перспективы

Проведенный анализ данных уровня и состояния проблем исследования процессов транспорта шламов в скважинах с произвольной образующей ее ствола позволяет отметить следующее.

1. Физические механизмы возникновения условий, обеспечивающих транспорт частиц произвольного размера и геометрии, в большой мере остаются необъясненными, несмотря на достаточно долгую историю их интенсивных исследований.
2. Явления процессов переноса массы, импульса в транспортируемой среде описываются нетривиальными соотношениями, богатыми нелинейными эффектами.
3. Процедуры расчета, методы наблюдений и их инструментарий ориентированы на анализ пространственных процессов в малоразмерных участках испытательных секций преимущественно в квазистационарных условиях, что создает проблемы обобщения развития явлений с конвективно-диффузионным взаимодействием в прямолинейном и закрученном движениях рабочей гомогенной и гетерогенной аномально-вязкой среды.
4. Моделирование вращательных течений бурового раствора еще находится в стадии идентификации, анализа, понимания и требует детальных разработок эффективных теоретических и экспериментальных методов их исследования.
5. Последние 30–40 лет рубежа XX–XXI вв. выявили определяющее влияние и роль реологических свойств рабочей жидкости на интенсивность и эффективность процесса очистки. В связи с этим в ближайшие годы внимание исследователей будет сосредоточено на вопросах: уяснения эффектов течения смеси в потоке, закрученном стенкой буровой трубы; построения новых и совершенствования имеющихся математических моделей эволюции размеров слоя и процессов в шламе; определения эффектов от изменения реологических свойств сред, интенсифицирующих очистку; калибровки критериальных связей и их параметров в реальных условиях транспорта шлама, способствующих поддержанию оптимального режима функционирования специального бурового оборудования.
6. Инструментарий экспериментального оборудования с уникальными полномасштабными установками для измерений деталей пространственного поведения локальных и интегральных параметров процесса: полей скоростей, компонентного состава смеси и взаимодействий между частицами,

способен дать уточнения результатов, полученных на базе малоразмерных систем. По-видимому, за это могут отвечать «тонкие» эффекты в мелко-масштабных структурах, порождаемые процедурой работы большей измерительной секции и связанные с диффузионным переносом, которые способны повысить восприимчивость (склонность) частиц шлама к эрозии. Более того, разрешающая способность инструментария (фото- и видеотехника), процедуры обработки данных и сами результаты численного моделирования процессов развития и затухания крутки по длине по оригинальным RANS-моделям второго порядка позволяют уяснить особенности переходов вихревой природы при течении аномально-вязких систем. А представления о структуре потока в зонах очистки расширяют данные метода томографии с электрическим сопротивлением.

7. В практической части особую ценность приобретают результаты анализа деталей процесса транспорта по критериальным соотношениям, обобщающим многочисленные серии опытов: минимальной скорости, необходимой для эффективной очистки скважины в условиях угла наклона скважины меньше 45° (13); минимальной скорости переноса для частиц во взвешенном состоянии (14) и слое шлама (15); скоростей скольжения, контролирующей эффективность транспорта и очистки (18), (19); параметры потока, препятствующие механизмам образования слоя шламов (33); прогноза роста высоты слоя шлама (34) и значений критической кольцевой скорости (35); перепада поля давления и коэффициента сопротивления трения (36) и т. д.
8. В ряду актуальных и ждущих своего решения находятся проблемы: управления эквивалентной плотностью циркуляции [58]; увеличения крутящего момента, снижения скорости бурения и износа бурового оборудования, которые в рамках исследований очистки скважины определяют современную задачу бурения.
9. Общий анализ проблем представленного материала показывает, что наиболее плодотворными практическими шагами, обеспечивающими эффективность транспортировки шлама, будут: ограничение объема слоя шлама при бурении с помощью управления реологией бурового раствора и скоростями потока; эффективная эрозия данного слоя после бурения участка определенной длины. Причем последнее направление слабо изучено и опирается на отдельные результаты, описывающие процесс эрозии функциями экспоненциального вида, эмпирические коэффициенты которой требуют оптимизации на данных реального процесса.

10. Бурение на депрессии с использованием гибких труб содержит свои сложности и является предметом повышенного интереса. Отдельные исследования посвящены разработке новых буровых растворов [59–62], анализу течений с внезапным изменением скорости потока [63], что без ясного анализа очистки невозможно.

Приоритеты будущих научных разработок

Выполненное исследование позволяет определить ряд приоритетных задач транспорта шлама, в основе которых лежит гидродинамический подход, как универсальный ключ к пониманию эволюции дисперсных потоков во внутренних системах, осложненных инерционными эффектами, турбулентностью, столкновениями частиц, реофизическими изменениями свойств смеси, суть которых сводятся к следующему.

1. Требуется детальное физико-математическое и численное моделирование гидродинамических и диффузионных эффектов, сопровождающих изменение поля давления в затрубном пространстве. Это крайне важно, т. к. мониторинг процесса увеличения перепада давления в кольцевой области может дать оценки наличия объема шлама в затрубном пространстве, характерного для реальных условий бурения.
2. Необходимо уяснить особенности влияния закрученного течения, обусловленного орбитальным движением буровой колонны, на транспорт шлама. Эти процессы почти не изучены и актуальны в разработках замыканий к построению многопараметрических турбулентных гидродинамических и диффузионных моделей течения шлама в данных условиях.
3. С целью практических приложений важно проанализировать и установить закономерности процесса подвижности/осаждения частиц шлама при сдвиговом движении жидкости в широком диапазоне изменений параметров, характеризующих изменение ее реологических свойств. В настоящее время установлено, что различные жидкости со специфической реологией демонстрируют совершенно разные возможности при очистке отверстий.
4. Провести тщательную коррекцию имеющихся опытных данных по комплексному моделированию процессов транспорта шлама при сравнении их с современным материалом, полученным на полномасштабных установках, а также с использованием систем с контактной/бесконтактной регистрацией параметров. Например, лазерной анемометрии, томографии с электрическим сопротивлением, которая обеспечивает точную и кратковременную визуализацию кольцевого пространства, и может иметь большое значение при верификации математических, численных и полуматематических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Miska S., Reed T., Kuru E. *Advanced cuttings transport study. Technical Report*. Tulsa, Oklahoma, USA, University of Tulsa, 2004. 284 p.
2. Yan T., Wang K., Sun X., Luan S., Shao S. State-of-the-art cuttings transport with aerated liquid and foam in complex structure wells. *Renewable and Sustainable Energy. Reviews*, 2014, vol. 37, pp. 560–568.

3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and production practice*. New York, American Petroleum Institute, January 1941. pp. 91–103.
4. Hall H.N., Thompson H., Nuss F. Ability of drilling mud to lift bit cuttings. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, vol. 2, no. 2, pp. 35–46.
5. Williams C.E. Jr, Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds. *Journal of Petroleum Technology*, 1951 vol. 3, no. 4, pp. 111–120.
6. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, vol. 19, no. 6, pp. 807–814.
7. Zeidler U.H. An experimental analysis of the transport of drilled particles. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, vol. 12, no. 1, pp. 39–48.
8. Wadell H. Volume, shape, and roundness of quartz particles. *The Journal of Geology*, 1935, vol. 43, no. 3, pp. 250–280.
9. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Wahl H.A. Drill cutting transport in full scale vertical annuli. *Meeting of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mechanical Engineers*. Las Vegas, Nevada, USA, January 1973. pp. 1–12.
10. Zeidler U.H. *Fluid and drilled particle dynamics related to drilling mud carrying capacity*. Dr. Diss. Tulsa, 1974. 152 p.
11. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, vol. 34, no. 9, pp. 1929–1937.
12. Hussaini S.M., Azar J.J. Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, vol. 23, no. 1, pp. 11–20.
13. Tomren P.H., Iyoho A.W., Azar J.J. Experimental study of cuttings transport in directional wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 43–56.
14. Fujii K., Sato M. Carrying capacity of liquid flowing through annulus of inclined pipes. *Journal of the Japanese Association of Petroleum Technology*, 1965, vol. 30, pp. 34–39.
15. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston. *Heat Transfer Research*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 233–243.
16. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *Proc. of the 5th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. pp. 105–109.
17. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
18. Pang B., Wang S., Jiang X., Lu H. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 174, pp. 201–215.
19. Busch A., Johansen S.T. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, no. 4, pp. 107–136.
20. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
21. Gavignet A.A., Sobey I.J. A model for the transport of cuttings in highly deviated wells. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, LA, USA, 5 October 1986. pp. 916–921.
22. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference. Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. New Orleans, LA, USA March 1987. pp. 293–303.
23. Seeberger M.H., Matlock R.W., Hanson P.M. Oil muds in large-diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problem. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, February 1989. pp. 161–170.
24. Nance W.B. How to select oil mud applications. *Journal of the Petroleum Engineering Institute*, 1984, vol. 56, no. 1, pp. 854–867.
25. Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin M.B., Gao E., Zarrouh R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, LA, USA. September 1990. pp. 197–206.
26. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, October, 1990. pp. 393–404.
27. Luo Y. *Non-Newtonian annular flow and cuttings transport through drilling annuli at various angles*. Dr. Diss. Edinburgh, UK, 1988. 311 p.
28. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport performance in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling Engineering*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 16–24.
29. Savins J.G. Generalized Newtonian (pseudoplastic) flow in stationary pipes and annuli. *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers*, 1958, no. 213, pp. 325–332.
30. Craft B.C., Holden W.R., Graves E.D. *Well design: drilling and production*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1962. pp. 73–79.
31. Sifferman T.R., Becker T.E. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1992, vol. 7, no. 2, pp. 115–120.
32. Sanchez R.A., Azar J.J., Bassal A.A., Martins A.L. The effect of drillpipe rotation on hole cleaning during directional well drilling. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference*. Amsterdam, the Netherlands, March 1997. pp. 459–467.
33. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 1997, vol. 12, no. 2, pp. 129–136.
34. Martins A.L., Campos W., Liporace F.S., Wei X., Van Riet E.J. On the erosion velocity of a cuttings bed during the circulation of horizontal and highly inclined wells. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Rio de Janeiro, Brazil, August 1997. pp. 1–8.
35. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings. *SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition*. New Delhi, India, April 1998. pp. 1–8.
36. Taylor G.I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1923, no. 223, pp. 289–343.
37. Lockett T.J., Richardson S.M., Worraker W.J. The importance of rotation effects for efficient cuttings removal during drilling. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference*. Amsterdam, Netherlands, February 1993. pp. 861–867.
38. Martins A.L., Lourenco A.M.F., De Sa C.H.M. Foam properties requirements for proper hole cleaning while drilling horizontal wells in underbalanced conditions. *Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Brisbane, Australia, October 2000. pp. 1–11.
39. Beyer A.H., Millhone R.S., Foote R.W. Flow behavior of foam as a well circulating fluid. *The fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of American Institute of Mechanical Engineers*. San Antonio, Texas, USA, October 1972.
40. Lourenço A.M., Martins A.L., Sa C.H., Brandao E.M., Shayegi S. Drilling with foam: stability and rheology aspects. *Engineering Technology and Commonwealth Engineering/Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2000. Joint Conference on Energy for the New Millennium*. New Orleans, USA, 2000. pp. 14–17.
41. Walker S., Li J. The effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport. *Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association coiled tubing roundtable*. Houston, Texas, USA, April 2000. pp. 1–10.
42. Li J., Walker S. Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2001, vol. 6, no. 4, pp. 356–363.
43. Naganawa S., Oikawa A., Masuda Y., Tetsuo Y., Hoshino M., Acuna P. Cuttings transport in directional and horizontal wells while aerated mud drilling. *International Association of Drilling*

- Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology*. Jakarta, Indonesia, September 2002. pp. 1–8.
44. Vieira P., Miska S., Reed T., Kuru E. Minimum air and water flow rates required for effective cuttings transport in high angle and horizontal wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers drilling conference*. Dallas, Texas, USA, February 2002. pp. 1–12.
45. Avila R., Pereira E., Miska S., Takach N., Saasen A. Correlations and analysis of cuttings transport with aerated fluids in deviated wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. Dallas, Texas, USA, March 2004. pp. 1–12.
46. Duan M., Miska S.Z., Yu M., Takach N.E., Ahmed R.M., Zettner C.M. Transport of small cuttings in extended reach drilling. *The International Oil & Gas Conference and Exhibition in China*. Beijing, China, December 2006. pp. 1–9.
47. Ozbayoglu M.E., Saasen A., Sorgun M., Svanes K. Critical fluid velocities for removing cuttings bed inside horizontal and deviated wells. *Petroleum Science and Technology*, 2010, vol. 28, no. 6, pp. 594–602.
48. Gumati A., Takahashi H. Experimental study and modeling of pressure loss for foam-cuttings mixture flow in horizontal pipe. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, vol. 23, no. 4, pp. 431–438.
49. Sorgun M., Aydin I., Ozbayoglu M.E. Friction factors for hydraulic calculations considering presence of cuttings and pipe rotation in horizontal/highly-inclined wellbores. *Journal of petroleum science and engineering*, 2011, vol. 78, no. 2, pp. 407–414.
50. Sorgun M. Simple correlations and analysis of cuttings transport with newtonian and non-newtonian fluids in horizontal and deviated wells. *Journal of Energy Resources Technology*, 2013, vol. 135, no. 3, pp. 1–6.
51. Bourgoyne A.T. Jr, Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S. Jr. Applied drilling engineering. *Society of Petroleum Engineers*. Richardson, Texas, USA, 1991. pp. 145–155.
52. Naganawa S., Sato R., Ishikawa M. Cuttings-transport simulation combined with large-scale-flow-loop experimental results and logging-while-drilling data for hole-cleaning evaluation in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 194–207.
53. Zhang F. *Numerical simulation and experimental study of cuttings transport in intermediate inclined wells*. Phd Thesis. Tulsa, 2015. 262 p.
54. Zhang F., Miska S., Yu M., Ozbayoglu E., Takach N. A fast graphic approach to estimate hole cleaning for directional drilling. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 51–58.
55. Werner B. *The influence of drilling-fluid rheology on cuttings-bed behavior*. PhD Thesis. Trondheim, Norway, 2018. 116 p.
56. Qureshi M.F., Ali M., Rahman M.A., Hassan I., Rasul G., Hassan R. Experimental Investigation of multi-phase flow in an annulus using electric resistance tomography. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers*. Mishref, Kuwait, October 2019. pp. 1–11.
57. Zahid A.A., Hasan A., Hassan I., Rahman M.A., Rushd S. Experimental investigation of volume fraction in an annulus using electrical resistance tomography. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 1–10.
58. Zhang F., Filippov A., Miska S., Yu M. Hole cleaning and ECD management for drilling ultra-long-reach laterals. *Society of Petroleum Engineers Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, March 2017. pp. 1–8.
59. Oseh J.O., Norddin M.M., Ismail I., Ismail A.R., Gbadamosi A.O., Agi A., Effect of the surface charge of entrapped polypropylene at nanosilica-composite on cuttings transport capacity of water-based muds. *Applied Nanoscience*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 61–82.
60. Boyou N.V., Ismail I., Sulaiman W.R.W., Haddad A.S., Husein N., Hui H.T., Nadaraja K. Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 176, pp. 220–231.
61. Alshalan M., Alolayan A., Al-Rubaii M.M., Moellendick T. A novel polymer to create a new approach of hole cleaning. *International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, January 2020. pp. 1–10.
62. Yeu W.J., Katende A., Sagala F., Ismail I. Improving hole cleaning using low density polyethylene beads at different mud circulation rates in different hole angles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, no. 61, pp. 333–343.
63. Zhu X., Shen K., Li B., Lv Y. Cuttings transport using pulsed drilling fluid in the horizontal section of the slim-hole: an experimental and numerical simulation study. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 20, pp. 1–22.

Поступила 16.11.2020 г./Received: 16 November 2020.

Информация об авторах

Харламов С.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Джангхорбани М., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

PROCEDURES AND INSTRUMENTS FOR MONITORING PROCESSES AND MECHANISMS OF CUTTING TRANSPORT IN HYDRAULIC CLEANING OF HORIZONTAL WELLS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The article relevance is caused by the need to identify, understand, predict and control physical mechanisms that accompany well cleaning from drill cuttings. The risk of poor-quality cleaning creates conditions that exacerbate the processes of stuck pipe, well control, reduced drilling speed, and wear of drilling special equipment, especially when increasing the number of holes drilled at large angles. Such extreme situations are characteristic for long horizontal wells. Currently, they are widely used due to their increased productivity and exceptional efficiency in reaching certain productive formations. All this characterizes the problem of finding and developing effective methods for cleaning wells, as one of the most important tasks of modern drilling.

The main aim of this article is to better understand the phenomena and actually develop methods for predicting processes during hydraulic cleaning of horizontal wells from cuttings in order to determine the priorities of future scientific and practical development of cleaning processes.

Methods: theoretical and experimental modeling of flows of solid particles carried by the flow of a viscous medium in situations related to the cleaning of horizontal wells; practical research methods for issues such as sedimentation, coagulation and the flow of rheologically complex viscous media in the annulus of wells with arbitrary geometries.

Results. The paper introduces the review and analysis of modern experimental and theoretical results of modeling the process of cleaning horizontal wells. Based on the results of monitoring, the authors have formulated a number of criteria-based relationships and rules of thumb that guide technical design of equipment components and forecasts of optimal hydraulic cleaning conditions. The capabilities of models, methods, and tools of experimental equipment for recording, forecasting, and controlling the regimes of translational-rotational motion of mixtures in wells with a curved wall geometry are critically evaluated. The inconsistencies of the observed and calculated processes during hydraulic cleaning within the framework of the equipment used are explained.

Key words:

Cuttings, particles, well, cleaning, modeling, hydrodynamics, rheology, structure, stress.

Information about the authors

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc, professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Mehran Janghorbani, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 574:504.3.054:541.182.2

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ СНЕГОВОГО ПОКРОВА МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ (НА ПРИМЕРЕ СЕЛА ДОЛОНЬ ВОСТОЧНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ, РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН)

Темиржанова Арай Ермаковна¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Дюсембаева Мадина Талгатовна¹,
koigeldinova@nnc.kz

Лукашенко Сергей Николаевич²,
lukashenko.1962@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич³,
yazikoveg@tpu.ru

Шакенов Ербол Зейнелгазинович¹,
shakenov@nnc.kz

¹ Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбіт Атом, 2.

² Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии,
Россия, 249032, г. Обнинск, Киевское шоссе, 109 км.

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность данной работы обусловлена необходимостью расширения методов комплексных экологических исследований для оценки качества объектов окружающей среды малых населенных пунктов. Изучение элементного состава пылеаэрозольных выпадений даст наиболее полную картину о состоянии качества основных природных компонентов. Аэрозоли воздуха представляют собой сложную дисперсную систему, включающую в себя частицы размером менее 10 микрон. Эти частицы имеют как природное, так и техногенное происхождение: мелкодисперсные пылевые частицы почвы, растений, микроорганизмы, сажа, зола, составные части дымовых выбросов котельной, промышленности и т. д. Атмосферный воздух небольших населенных пунктов остается малоизученным, отсутствуют систематические данные о химическом составе атмосферных взвесей, в связи с чем и определяется актуальность данной работы.

Цель: определить элементный состав твердой фазы снегового покрова малого населенного пункта Долонь.

Объекты: пылеаэрозольные выпадения, твердые частицы аэрозолей воздуха, снеговой покров, уголь и зола.

Методы: масс-спектрометрический и атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты. Изучен элементный состав снеготалой воды и твердой фазы снега. Для определения степени летучести химических элементов рассчитан их коэффициент обогащения из угля в золу. Определены основные зоны с повышенным содержанием тяжелых металлов в пылеаэрозольных выпадениях. В снеговом покрове исследуемой территории выявлена группа элементов с высокой миграционной способностью. Построены карты загрязнения снегового покрова населенного пункта Долонь с выделением участков (ореолов загрязнения) с повышенным содержанием исследуемых групп элементов.

Ключевые слова:

Пылеаэрозольные выпадения, снежный покров, твердый осадок снега, снеготалая вода, пылевая нагрузка, тяжелые металлы.

Введение

На сегодняшний день для оценки качества атмосферного воздуха крупных промышленных зон, а также населенных пунктов с наличием источников вредных выбросов широко применяют косвенные методы. К таковым методам относится снеговая съемка для определения наличия и концентраций загрязняющих веществ атмосферного воздуха [1–10]. Формирование химического состава снегового покрова происходит за счет переноса и осаждения из окружающего воздуха твердых пылевых частиц техногенного и природного происхождения, растворения осадками газообразных сложных компонентов. При этом следует отметить, что количество твердых частиц и взвешенных веществ в

снеговом покрове характеризует запыленность территории и является одним из критериев степени загрязненности воздушного бассейна труднорастворимыми формами соединений и элементов [11–13]. Химический состав твердых частиц снегового покрова состоит преимущественно из элементов техногенного происхождения. Именно поэтому в настоящее время изучение элементного состава пылеаэрозольных выпадений, а также твердого осадка снега крупных и малых населенных пунктов по рекомендациям многих авторов представляет наибольший интерес с экологической точки зрения [14–21].

Впервые проведено комплексное исследование элементного состава пылеаэрозольных выпадений

снегового покрова малого населенного пункта – с. Долонь, расположенного на юго-западе Бескарагайского района Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан вдоль ленточного бора Иртышского бассейна. Населенный пункт является административным центром Долоньского сельского округа, где 80 % местного населения в зимний период для отопления домов используют древесину (сосна, осина), остальные 20 % – уголь с месторождения Каражыра.

Объекты и методы исследования

Уголь и зола. Отбор проб угля и золы провели в середине октября 2015 г. Навески пробы массой 0,2 г помещали в тefлоновый вкладыш, добавляли небольшими порциями 10 мл 7М HNO₃ марки «ос.ч.». Кислотное разложение проб проводили в герметичных автоклавах в течение 2,5 часов при температуре 160±5 °С. Объем кислотных вытяжек, полученных таким способом, доводили до 15 мл 7М HNO₃ марки «ос.ч.».

Снеготалая вода и твердый осадок снега. Методом шурфа в конце марта – начале апреля 2015 г. отобрали 30 проб снега. Шурфы были заложены по всей площади исследуемой территории. Метод шурфа предполагает закладку площадки размером 100×100 см на всю мощность снежного покрова, за исключением 5 см слоя над почвой, глубина шурфа в среднем не превышает 50 см. Масса снеговой пробы, отобранной с каждой площадки, составила примерно 10 кг. Также была отобрана «фоновая» проба на расстоянии 1,2 км в северо-западном направлении от села (рис. 1).

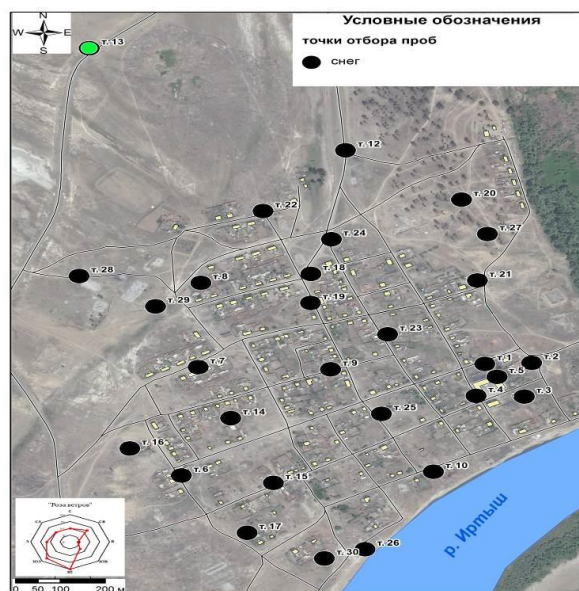


Рис. 1. Точки отбора проб

Fig. 1. Sampling points

Доставленные в лабораторию образцы снега размещали в глубокие емкости из пластмассы. В данных емкостях пробы оттаивали при комнатной температуре. После снеготалую воду отфуговывали для получения твердого осадка, и воду консервировали из

расчета на 1 л воды 3 мл концентрированной азотной кислоты марки «ос.ч.» и передавали на анализ. Твердые частицы снега перекладывали в чистую тefлоновую емкость и высушивали до постоянной массы при комнатной температуре. Высушенные образцы твердых частиц снега разлагали способом автоклавной минерализации с использованием концентрированных фтористоводородной (HF) и азотной (HNO₃) кислот в соотношении 1:2. Автоклавы выдерживали в сушильном шкафу в течение 4 ч, нагретом до температуры 160±5 °С, приливали 7М азотную кислоту и выпаривали раствор до образования сухих солей при температуре +160±5,0 °С. После охлаждения объем раствора доводили до 15 мл 7 М HNO₃.

Определение содержания химических элементов в анализируемых образцах проводили методами МС-ИСП с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x «Agilent Technologies» [22], а также АЭС-ИСП на приборе iCAP 6300 Duo «Thermo Scientific». Приготовили калибровочные растворы для построения градуировочных кривых из сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов – IV-ICPMS-71A, № 9300233, № 9300235, производства США, компании «Perkin Elmer». Относительное стандартное отклонение (RSD – relative standard deviation) измерений было меньше 10 %. Внутренний контроль качества измерений в лаборатории осуществляли путём измерения контрольного раствора (QC – quality control) с аттестованным содержанием исследуемых элементов через каждые 10 проб. Также для контроля воспроизводимости результатов во время анализа использовали контрольные (параллельные) образцы через каждые 15 проб. Эти процедуры применяются для выявления неопределенностей процесса пробоподготовки для элементного анализа. При неудовлетворительном результате применяемых методов контроля качества (отклонение калибровочного графика на 8–10 %, отклонение контроля точности и показателей параллельных образцов от аттестованных значений на 20 %) заново строили градуировочную кривую для исследуемых элементов. Анализ проб проводили на определение таких элементов, как Be, Mg, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Mo, Cd, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Pb, Th, U, по методике ISO 17294-2:2003 (E) с номером государственной регистрации 022/10505 от 27.12.2005 г.

Для того чтобы соотнести исследуемые компоненты в пробах угля с определенным классом по степени летучести и обогащаемости в золе рассчитали коэффициент обогащения (K^0) элементов, вычисляемый по формуле (1):

$$K^0 = C_z / C_y, \quad (1)$$

где C_z – содержание исследуемого элемента в золе, мг/кг; C_y – содержание исследуемого элемента в угле, мг/кг.

Количество пылеаэрозольных выпадений, экспонированных непосредственного в снегу, определяли с помощью показателя пылевой нагрузки (Pn) [23] как критерий загрязнения на единицу площади за определенный период (2):

$$P_n = P_0 / (S \times t), \quad (2)$$

где P_0 – масса пыли в пробе, мг; S – площадь шурфа, m^2 ; t – время от начала снегопада до отбора пробы, сутки.

Также рассчитали показатель баланса между наличием химических элементов в составе твердой фазы и снеготалой воды снегового покрова [23, 24]. Долю в процентах содержания химического элемента, относящуюся к твердой фазе снега ($D_{ТОС}$), рассчитывали согласно формулам (3.1–3.4):

$$D_{ТОС} = (P_{i_{ТОС}} \times 100) / P_{i_{сн\text{ег}}}, \quad (3.1)$$

$$P_{i_{сн\text{ег}}} = P_{i_{ТОС}} + P_{i_{сн\text{еготалая вода}}}, \quad (3.2)$$

$$P_{i_{ТОС}} = (C_{мг/кг} \times P) / 1000, \quad (3.3)$$

$$P_{i_{сн\text{еготалая вода}}} = C_{i_{сн\text{еготалая вода}}} \times V, \quad (3.4)$$

где $P_{i_{ТОС}}$ – масса химического элемента в составе твердой фазы снега, мг; $P_{i_{сн\text{ег}}}$ – масса химического элемента в составе снеговой пробы в целом, мг; $P_{i_{сн\text{еготалая вода}}}$ – масса химического элемента в составе снеготалой воды, мг; C – концентрация химического элемента в твердой фазе снега, мг/кг; P – масса пыли в пробе снега, г; $C_{i_{сн\text{еготалая вода}}}$ – концентрация химического элемента в снеготалой воде, мг/дм³; V – объем растворимой фазы снега, полученный после таяния снеговой пробы, дм³.

Процентную долю содержания химического элемента, приходящуюся на снеготалую фазу снега ($D_{сн\text{еготалая вода}} - D_{с.в.}$), рассчитывали согласно формуле (4):

$$D_{сн\text{еготалая вода}} = 100 - D_{ТОС}. \quad (4)$$

Обсуждение результатов

Снег. Для изучения динамики содержания и пространственного распределения химических элементов в снеговом покрове исследуемой территории определены их концентрации водорастворимых и трудно-растворимых форм. Среднее содержание и пределы колебаний химических элементов в жидкой и твердой фазах снегового покрова представлены в табл. 1.

Концентрация элементов в снеготалой воде варьирует от 0,0005 до 280 мкг/л. Также в жидкой фазе снега фоновой пробы определены значения концентрации химических элементов меньше предела обнаружения прибора. На сегодняшний день отсутствуют показатели допустимых уровней содержания химических элементов в снежном покрове. Поэтому для оценки предельно допустимых концентраций химических элементов в снежном покрове современные авторы используют фоновый подход. В данном случае в качестве основного значения принято считать содержание i -го элемента в снежном покрове относительно его концентрации в снеге, отобранном с фоновой территории. При этом данный участок характеризуется однородностью ландшафта и неподверженностью техногенному воздействию [25, 26]. По такому же принципу содержание химических элементов в составе снега малых населенных пунктов сравнивали с их концентрациями в снегу, отобранном с фонового участка.

В нашем исследовании при анализе состояния фонового участка выявлено относительно высокое содержание галлия и урана в твердой фазе снежного

покрова, в сравнении с другими элементами, концентрация которых составила меньше предела обнаружения прибора. Это, вероятно, связано с переносом твердых частиц аэрозолей воздуха диаметром менее 2,5 микрон, которые содержатся в составе сажи, пыли, зольного остатка, на дальние расстояния и метео-условиями регионального климата. Следует отметить, что содержание исследуемых химических элементов в снеготалой воде не превышает их предельно допустимые концентрации (ПДК) в питьевой воде, указанные в санитарно-эпидемиологических требованиях.

Таблица 1. Среднее содержание и пределы колебания химических элементов в снежном покрове ($n=30$)

Table 1. Average content and variation limits of chemical elements in the snow cover ($n=30$)

Элемент Element	Снеготалая вода Melted snow		Твердый осадок снега Solid snow deposition	
	мкг/л μg/l	Фоновая проба Background sample	мг/кг mg/kg	Фоновая проба* Background sample*
V	$1,0 \pm 0,2$ 0,3–6,7	<0,05	$60 \pm 6,5$ 14–170	<0,05
Cr	$0,20 \pm 0,03$ 0,03–0,6	<0,01	$60 \pm 9,1$ 4–240	<0,01
Mn	12 ± 3 0,2–88	<0,1	380 ± 46 88–1100	<0,1
Fe	50 ± 14 6–280	<0,5	22000 ± 2500 5300–61000	310 ± 6
Co	$0,20 \pm 0,01$ 0,020–1,6	<0,01	$12 \pm 1,4$ 2,2–34	<0,01
Ni	$0,50 \pm 0,10$ 0,020–2,40	<0,01	$38 \pm 5,0$ 3–120	<0,01
Cu	$1,3 \pm 0,3$ 0,4–10	<0,1	140 ± 58 2–1700	<0,1
Zn	$1,3 \pm 0,1$ 0,2–170	<0,1	430 ± 120 7–3500	<0,2
Ga	$2,0 \pm 0,2$ 0,7–6,8	<0,1	$46 \pm 6,1$ 5,0–130	$0,4 \pm 0,1$
As	$1,0 \pm 0,1$ 0,4–3,5	<0,1	$24 \pm 5,1$ 3–130	<0,25
Sr	$18 \pm 3,4$ 4,1–95	<0,1	150 ± 25 17–580	<0,1
Cd	$0,07 \pm 0,01$ 0,005–0,40	<0,001	$4,4 \pm 1,1$ 0,2–23	<0,001
La	$0,030 \pm 0,001$ 0,004–0,2	<0,001	$19 \pm 1,8$ 6–46	<0,001
Ce	$0,05 \pm 0,01$ 0,007–0,4	<0,001	$40 \pm 4,0$ 12–95	<0,001
Nd	$0,02 \pm 0,01$ 0,005–0,06	<0,001	$20 \pm 2,0$ 6,1–48	<0,001
Sm	$0,0005 \pm 0,0001$ 0,0005–0,060	<0,0001	$4,7 \pm 0,7$ 1,3–20	<0,0001
Pb	$0,7 \pm 0,3$ 0,06–7,2	0,10	120 ± 18 9–410	<0,1
Th	$0,030 \pm 0,001$ 0,003–0,3	<0,001	$4,0 \pm 0,4$ 1,1–10	<0,001
U	$0,030 \pm 0,004$ 0,004–0,11	<0,001	$1,2 \pm 0,2$ 0,3–4,3	$0,04 \pm 0,01$

Примечание: n – количество проб, в числителе – среднее содержание и его ошибка, в знаменателе – минимальное и максимальное значение концентрации; * – пределы обнаружения прибора выражены в мкг/л.

Note: n – number of samples, in the nominator – the average content and uncertainty, in the denominator – minimum and maximum concentration value; * – instrument detection limits are expressed in μg/l.

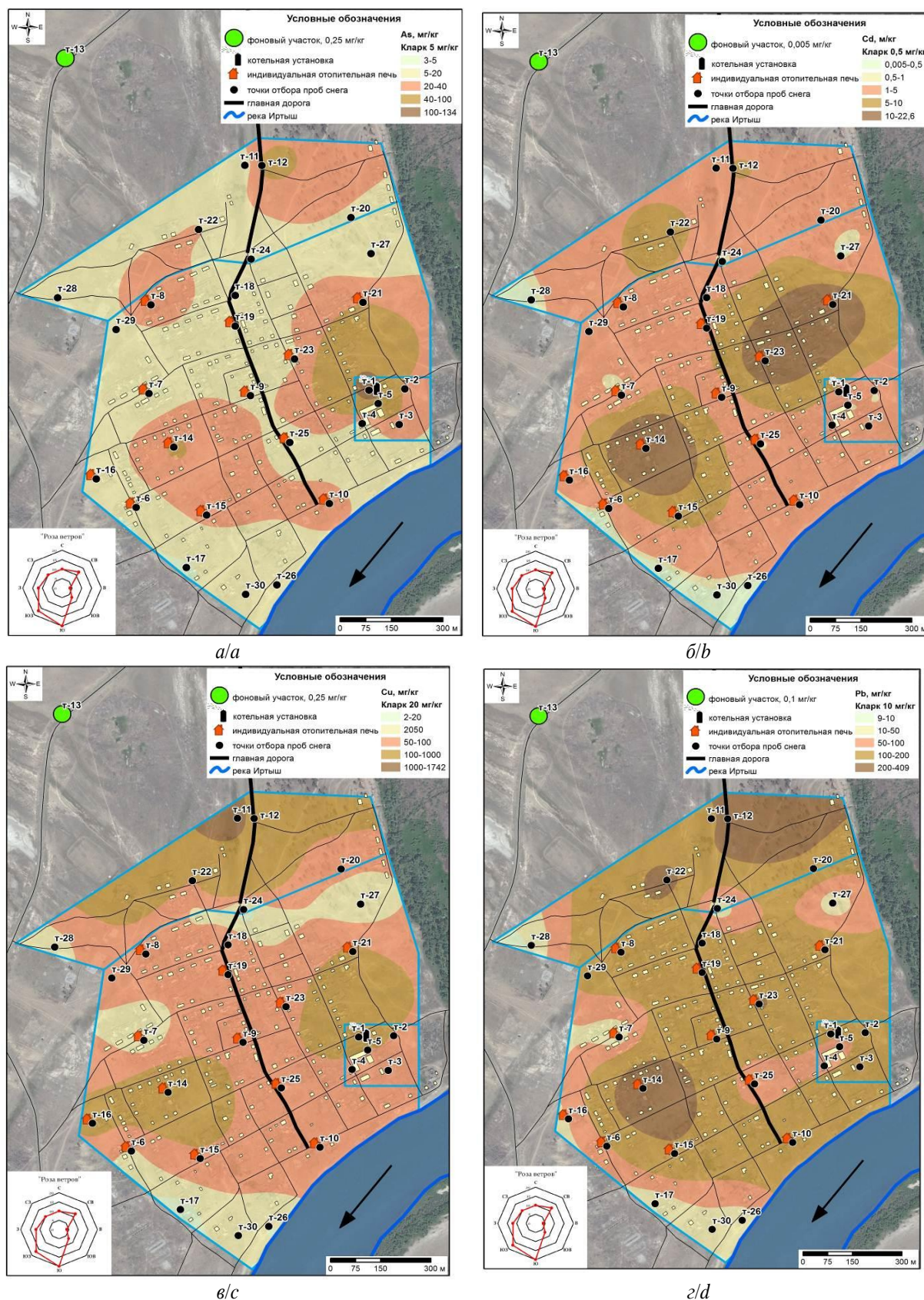


Рис. 2. Распределение концентрации элементов в твердой фазе снежного покрова: мышьяка (а), кадмия (б), меди (в) и свинца (г)

Fig. 2. Distribution of elements concentration in the solid phase of the snow cover: arsenic (a), cadmium (b), copper (c) and lead (d)

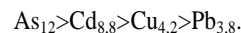
Наибольший интерес представляет анализ содержания химических элементов в твердой фазе снегового покрова, поскольку в ней содержится основная часть элементов техногенного происхождения, выбрасываемых в слаборастворимой форме. Труднорастворимые формы исследуемых элементов определены с помощью выщелачивания минеральными кислотами твердого осадка снега способом автоклава. Содержание химических элементов в твердом осадке снега составляет от 0,04 до 61000 мг/кг. В твердом осадке снега с фонового участка выявлены концентрации железа, галлия и урана со следующим содержанием – 310; 0,4 и 0,04 (мг/кг).

Снег, отобранный на участках с постоянным антропогенным прессом, как показали исследования, содержит в своих труднорастворимых частицах концентрации элементов, в значительной мере превышающие содержание, установленное в пробах снега с фонового участка. Из всех изучаемых нами элементов наиболее высокие концентрации показали As, Cd, Cu и Pb. С помощью картирования снежного покрова исследуемой территории определены «участки» распространения концентраций вышеперечисленных химических элементов и установлены зоны влияния источников их поступления (рис. 2, а–г).

По представленным данным в твердой фазе снега выявлена группа элементов, содержание которых превышает их ПДК в почве, утвержденные совместным приказом Министерства здравоохранения и Министерства охраны окружающей среды Республики

Казахстан. К данной группе относятся: мышьяк, кадмий, медь и свинец.

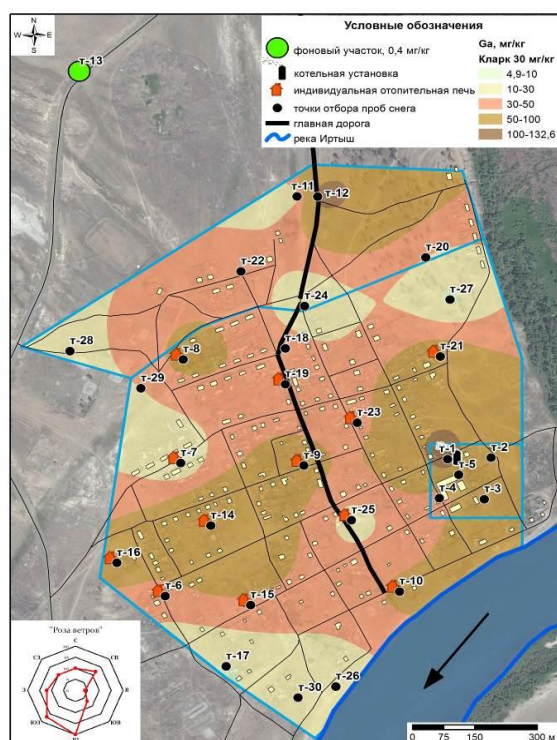
Далее представлен убывающий ряд загрязнения снежного покрова исследуемой территории:



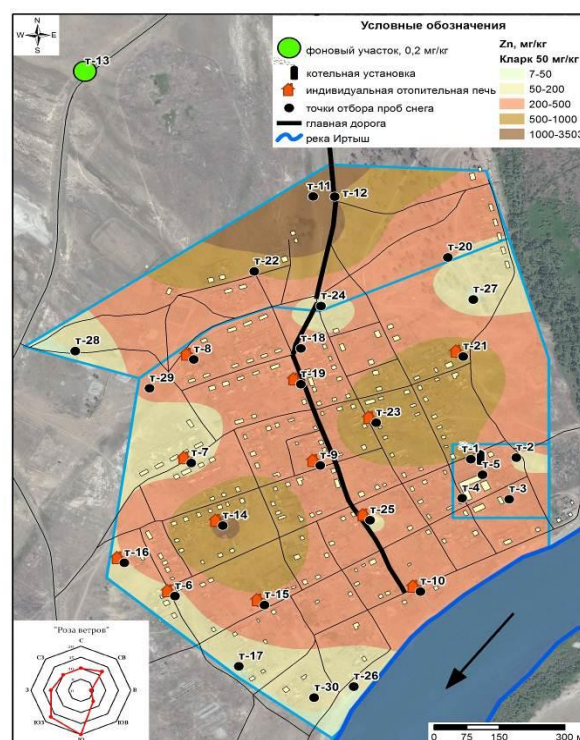
Примечание: в индексе указана кратность превышения ПДК данных элементов в почве.

В снежном покрове содержание элементов определяется размещением и мощностью источников поступления элементов. Как видно из представленных карт, основным источником поступления мышьяка в снеговой покров является котельная, расположенная в юго-восточной части села. Также выявлены локальные участки загрязнения снежного покрова мышьяком, кадмием, медью и свинцом по всей площади села. Уровни накопления данных поллютантов в твердых частицах снега снижаются по мере удаления от их источников поступления. В частности, наблюдается снижение концентрации кадмия в твердом осадке снега по мере удаления от точек 21, 23, 14. Выявлено высокое содержание меди в пробе снега, отобранной с точки 11. Определено содержание свинца в твердом осадке снега, превышающее его ПДК в почве в точках 12, 22, которые расположены в непосредственной близости от транспортной дороги, а также в точках 14, 23. Наблюдается тенденция распространения концентрации загрязняющих элементов по господствующему направлению ветра в отопительный сезон.

Также в пробах твердой фазы снега определено содержание галлия и цинка, превышающее их кларки в составе земной коры (рис. 3, а, б).



а/а



б/б

Рис. 3. Распределение концентрации галлия (а) и цинка (б) в твердой фазе снегового покрова

Fig. 3. Distribution of gallium (a) and zinc (b) concentration in snow cover solid phase

Как видно из представленных данных, среднее содержание галлия превышает его кларк в 2,4 раза, цинка в – 5 раз соответственно.

Фоновая проба снега, отобранная на расстоянии 1,2 км в северо-западном направлении от села, характеризуется природными значениями содержания изученных элементов, не превышающими их средний состав в почве и земной коре.

Таким образом, при нормировании содержания тяжелых металлов в твердой фазе снега к их предельно допустимой концентрации в почве выявлены участки территории села Долонь с повышенным содержанием ряда тяжелых металлов, а именно мышьяка, кадмия, меди и свинца.

Для получения общей картины о концентрации элементов в снеговом покрове с. Долонь проведен расчет о долях содержания их в жидкой и твердой фазах. Доля растворенных форм нахождения химических элементов в пробах снега исследуемой территории относительно мала за исключением кадмия, галлия мышьяка и стронция. Для указанных элементов, характеризующихся высокой степенью подвижности, доля содержания растворённых форм нахождения преобладает над взвесью на 40–60 %. По полученным данным можно предположить возможные изменения концентраций этих элементов в почве в зависимости от степени подвижности. Это может быть обусловлено интенсивным пылевым притоком из атмосферного воздуха (сжигание топлива), физико-химическими условиями среды и природой самих элементов.

Одним из критериев оценки состояния атмосферного воздуха в зимний период является выявление среднесуточной пылевой нагрузки (P_n). В отопительный сезон величина среднесуточной P_n [27] на исследуемой территории изменяется от 5 до 450 мг/(м²хсут.). По степени запыленности исследуемую территорию можно условно разделить на участки со средней и низкой степенями нагрузки в отопительный сезон. Так, участки возле котельной (т. 5), на пересечении транспортных дорог (т. 24), и на юго-западе села (т. 17) характеризуются средней степенью пылевой нагрузки. Следует отметить, что для участка территории, который расположен в северо-восточной части села, выявлен наибольший показатель пылевого притока – 450 мг/(м²хсут.) [23].

Уголь и зола. Одним из косвенных показателей содержания в атмосферном воздухе химических элементов, в том числе тяжелых металлов, являются данные по выбросам твердых веществ (сжигание органического топлива). Снеговой покров, как уже было отмечено выше, является депонирующей средой для выбросов всех промышленных объектов, в том числе отопительных систем (котельная), которые содержат нормируемые и ненормируемые компоненты. Твердые частицы от вышеуказанных источников накапливаются в снегу за период с ноября (образование устойчивого снегового покрова) до конца марта (начало снеготаяния).

Среднее содержание химических элементов в пробах угля и золы исследуемого населенного пункта представлено в табл. 2.

Таблица 2. Среднее содержание и пределы колебания химических элементов в образцах угля и золы, используемых в с. Долонь мг/кг ($n=10$)

Table 2. Average content and variation limits of chemical elements in coal and ash samples for Dolon village, mg/kg ($n=10$)

Элемент Element	Уголь Coal	Зола Ash	*K° *Ef
Be	$0,43 \pm 0,02$ 0,40–0,50	$1,6 \pm 0,1$ 1,3–1,8	3,7
Mg	580 ± 7 570–610	2100 ± 120 1600–2300	3,6
V	40 ± 1 37–46	150 ± 8 120–170	3,5
Cr	25 ± 1 22–30	75 ± 4 58–86	3,0
Mn	94 ± 7 75–130	310 ± 50 150–490	3,3
Fe	4500 ± 420 3700–6500	11000 ± 860 9700–12100	2,4
Co	$6,0 \pm 0,4$ 5,0–8,0	23 ± 2 16–27	3,8
Ni	17 ± 1 16–20	64 ± 5 46–78	3,8
Cu	40 ± 1 33–42	180 ± 15 120–220	4,5
Zn	50 ± 4 40–67	90 ± 7 70–120	1,8
Ga	11 ± 1 9–13	38 ± 3 32–53	3,6
Ge	$1,3 \pm 0,1$ 1,2–1,6	$3,2 \pm 0,3$ 2,0–4,0	2,3
As	$3,0 \pm 0,3$ 2,0–4,0	$9,3 \pm 0,8$ 7,0–11,0	3,0
Rb	$8,0 \pm 0,1$ 8,0–8,0	22 ± 1 20–24	2,5
Sr	160 ± 8 130–180	580 ± 50 400–750	3,8
Mo	$0,50 \pm 0,03$ 0,50–0,60	$1,4 \pm 0,2$ 0,8–2,1	2,8
La	$6,6 \pm 0,3$ 6,0–8,0	23 ± 2 15–29	3,3
Ce	16 ± 1 13–18	58 ± 5 35–73	3,6
Pr	$2,0 \pm 0,1$ 2,0–2,0	$7,3 \pm 0,6$ 5,0–9,0	3,7
Nd	10 ± 1 9–12	35 ± 3 24–42	3,5
Sm	$2,0 \pm 0,2$ 2,0–3,0	$8,2 \pm 0,5$ 6,0–9,0	4,1
Pb	$4,5 \pm 0,5$ 3,1–6,5	$15 \pm 0,7$ 12–16	3,3
Th	$0,80 \pm 0,04$ 0,60–0,90	$2,8 \pm 0,2$ 2,1–3,2	3,8
U	$0,20 \pm 0,01$ 0,20–0,20	$0,8 \pm 0,1$ 0,6–0,9	4,0

Примечание: n – количество проб, в числителе – среднее содержание и его ошибка, в знаменателе – минимальное и максимальное значение концентрации; *K° – коэффициент обогащения.

Notice: n – number of samples, in the numerator – the average content and uncertainty, in the denominator – minimum and maximum concentration values; *Ef – enrichment factor.

Как видно из таблицы, среднее значение коэффициента обогащения элементов для угля равно приблизительно 3,4. Если $K^\circ \leq 3,4$, то при озолении угля элементы, подвергаемые температурному воздействию, больше переходят в газовую форму и истощаются в

зольном остатке. При $K^0 > 3,4$ элементы переходят больше в твердую фазу зольного остатка.

По данным таблицы значение коэффициента обогащения до 3,4 характерно для следующих элементов: Cr, Mn, Fe, Zn, Ge, As, Rb, Mo, La и Pb. Возможно, в отопительный период поступление в атмосферу данных элементов-примесей при сгорании угля будет значительно, что частично подтверждено исследованиями по изучению элементного состава аэрозолей, а именно выявленными зимой высокими содержаниями мышьяка и молибдена [28, 29].

Поступление химических элементов в компоненты природной среды (вода, воздух, почва, снег) при сжигании угля происходит за счет распространения в составе летучей сажи на дальние расстояния и выпадения крупных частиц золы вблизи источника [30]. Возможно, элементы с $K^0 > 3,4$ Be, Mg, V, Co, Ni, Cu, Ga, Sr, Ce, Pr, Nd, Sm, Th и U распространяются в составе летучей золы и в дальнейшем осаждаются на снеговой покров.

Поскольку утвержденные экологические нормативы содержания микроэлементов в угле и золе отсутствуют, при анализе полученных результатов были использованы кларки элементов-примесей в каменных углях и их золе [31]. В пробах угля обнаружены концентрации ванадия, хрома, меди, цинка, галлия и стронция, превышающие их кларки в 2 раза. Высокие содержания этих же элементов, за исключением ванадия, обнаружены в твердом осадке снега, т. е. в пылеаэрозольных выпадениях, что было отмечено выше. В исследуемых образцах золы содержание меди превышает его кларк в 2 раза и предельно допустимую

концентрацию в почве в 5 раз. В целом угли исследуемого месторождения с экологической точки зрения могут считаться нетоксичными. Однако в процессе сжигания топлива и при значительном рассеивании летучей золы и зольного остатка некоторые элементы могут накапливаться в окружающей среде.

Заключение

Содержание химических элементов в снежном покрове исследуемой территории значительно превышает их фоновые значения. Выявлены участки территории села Долонь с повышенным содержанием ряда тяжелых металлов, а именно мышьяка, кадмия, меди и свинца.

В ходе проведенных работ выявлено, что существенную часть загрязнения снежного покрова составляют труднорастворимые формы химических элементов. Данная форма химических элементов содержится в твердых частицах пылеаэрозольных выпадений. Также в фильтрате талого снега определена водорастворимая форма некоторых химических элементов – Cd, Ga, As и Sr. Содержание данных элементов в жидкой фазе снега составляет от 40 до 60 % в сравнении с твердой фазой снега. Таким образом, в отопительный период для получения наиболее полной картины о состоянии воздушного бассейна необходимо изучение элементного состава твердой фазы снежного покрова. Данное исследование позволяет получить информацию о возможных источниках поступления химических элементов в атмосферу малых населенных пунктов, а также оценить качество воздуха исследуемой территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Snow spectral albedo at Summit, Greenland: measurements and numerical simulations based on physical and chemical properties of the snowpack / C.M. Carmagnola, F. Domine, M. Dumont, P. Wright, B. Strellis, M. Bergin, J. Dibb, G. Picard, Q. Libois, L. Arnaud, S. Morin // *The Cryosphere*. – 2013. – V. 7. – № 4. – P. 1139–1160.
2. McNeill V.F. Atmospheric aerosols: clouds, chemistry, and climate // *Annual review chemical and biomolecular engineering*. – 2017. – V. 8. – P. 427–444. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538
3. Холодов А.С. Геоэкологическая оценка загрязнения атмосферы малых и средних населенных пунктов Приморского края микроразмерными частицами: дис. ... канд. географ. наук. – Владивосток, 2019. – 184 с.
4. Аэрозоли Сибири / И.С. Андреева, А.Н. Анкилов, А.М. Бакланов, К.П. Куценогий. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 548 с.
5. Moloczniak A. Qualitative and quantitative analysis of agricultural dust in working environment // *Annals of agricultural environmental medicine*. – 2002. – V. 9. – № 1. – P. 71–78.
6. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013–2014 / Y. Wang, Q. Ying, J. Hu, H. Zhang // *Environment international*. – 2014. – V. 73. – P. 413–422. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.016.
7. Elilk A. Monitoring of heavy metals in urban snow as indicator of atmosphere pollution // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2002. – V. 82. – № 1. – P. 37–45.
8. Кириллин А.Р., Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова горных мерзлотных ландшафтов Эльконского ураново-рудного района // *Наука и образование*. – 2016. – № 4. – С. 64–69.
9. Исследования состояния снежного покрова Санкт-Петербурга / Е.М. Нестеров, Л.М. Зарина, М.А. Маркова, И.В. Грачева, А.В. Воронцова, Ю.А. Макарова // *Экологическая безопас-*
- ность строительства и городского хозяйства. – 2019. – № 1. – С. 29–35.
10. Опыт использования снежного покрова в качестве универсального показателя загрязнения урбанизированных территорий / Д.В. Машкин, А.А. Гушин, Т.В. Извекова, Ю.Г. Борова // *Известия Иркутского государственного университета*. Серия: Биология, Экология. – 2016. – Т. 18. – С. 58–73.
11. Филимонова Л.М., Паршин А.В., Бычинский В.А. Оценка загрязнения атмосферы в районе алюминиевого производства методом геохимической съемки снежного покрова // *Метеорология и гидрология*. – 2015. – № 10. – С. 75–84.
12. Fine particulate matter concentrations in urban Chinese cities, 2005–2016: a systematic review / M.Z. He, X. Zeng, K. Zhang, P.L. Kinney // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2017. – V. 14. – № 2. 191. DOI: 10.3390/ijerph14020191.
13. Personal and indoor PM_{2.5} exposure from burning solid fuels in vented and unvented stoves in a rural region of China with a high incidence of lung cancer / W. Hu, G.S. Downward, B. Reiss, J. Xu, B.A. Bassig, D. Hosgood, L. Zhang, W.J. Seow, G. Wu, R.S. Chapman, L. Tian, F. Wei, R. Vermeulen, Q. Lan // *Environmental Science and Technology*. – 2014. – V. 48. – № 15. – P. 8456–8464. DOI: 10.1021/es502201s
14. The level of air pollution in the impact zone of coal-fired power plant (Karaganda City) using the data of geochemical snow survey (Republic of Kazakhstan) / T.E. Adilbayeva, A.V. Talovskaya, Ye.G. Yazikov, I.A. Matveenko // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing. – 2016. – V. 43. – № 1. – P. 1–5.
15. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China / W. Hu, G.S. Downward, J.Y.Y. Wong, B. Reiss, N. Rothman, L. Portengen, J. Li, R.R. Jones, Y. Huang, K. Yang, Y. Chen, J. Xu, J. He, B. Bassig, W.J. Seow, H.D. Hosgood, L. Zhang,

- G. Wu, F. Wei, R. Vermeulen, Q. Lan // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – № 1:11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2.
16. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // Environmental Technology (United Kingdom). – 2018. – V. 39. – Iss. 18. – P. 2288–2303.
17. Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses / M.S. Bucko, T. Magiera, B. Johanson, E. Petrovsky, L.J. Pesonen // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 1266–1276.
18. Пожитков Р.Ю., Московченко Д.В., Кудрявцев А.А. Геохимия снежного покрова г. Нижневартовска // Вестник Тюменского государственного университета. Экология и природопользование. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 6–24.
19. Global sources of fine particulate matter: interpretation of PM2.5 chemical composition observed by SPARTAN using a global chemical transport model / C.L. Weagle, G. Snider, C. Li, A. van Donkelaar, S. Philip, P. Bissonnette, J. Burke, J. Jackson, R. Latimer, E. Stone, I. Abboud, C. Akoshile, N.X. Anh, J.R. Brook, A. Cohen, J. Dong, M.D. Gibson, D. Griffith, K.B. He, B.N. Holben, R. Kahn, Ch.A. Keller, J.S. Kim, N. Lagrosas, P. Lestari, Ye.L. Khian, Y. Liu, E.A. Marais, J.V. Martins, A. Misra, U. Muliane, R. Pratiwi, E.J. Quel, A. Salam, L. Segev, S.N. Tripathi, Ch. Wang, Q. Zhang, M. Brauer, Yi. Rudich, R.V. Martin // Environmental Science and Technology. – 2018. – V. 52. – № 20. – P. 11670–11681. DOI: 10.1021/acs.est.8b01658
20. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy / A. Genga, T. Siciliano, M. Siciliano, D. Aiello, C. Tortorella // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190. – № 8. 456. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9.
21. Global chemical composition of ambient fine particulate matter for exposure assessment / S. Philip, R.V. Martin, A. van Donkelaar, J.W. Lo, Y. Wang, D. Chen, L. Zhang, P.S. Kasibhatla, S. Wang, Q. Zhang, Z. Lu, D.G. Streets, S. Bittman, D.J. Macdonald // Environmental Science and Technology. – 2014. – V. 48. – № 22. – P. 13060–13068. DOI: 10.1021/es502965b
22. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия для анализа объектов окружающей среды. – М.: Техносфера, 2013. – 632 с.
23. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагит, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, А.И. Ачкасов, И.Л. Башаркевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, С.Ш. Саркисян, Р.С. Смирнова, Н.Я. Трефилова. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
24. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
25. Многолетний мониторинг снежного покрова в условиях природных и урбанизированных ландшафтов Москвы и Подмосковья / Л.Г. Богатырев, Н.И. Жилин, В.П. Самсонова, Н.Л. Якушев, Н.П. Кириллова, А.И. Бенедиктова, Ф.И. Земсков, М.М. Карпунин, Д.В. Ладонин, А.Н. Вартанов, В.В. Демин // Вестник Московского Университета. Серия 5. География. – 2018. – № 2. – С. 85–96.
26. О составе снега на территории Верхнекамского солевого месторождения / С.М. Блинов, Е.А. Меньшикова, Е.Н. Батурич, Е.С. Ушакова, Л.Р. Золотарев // Лёд и Снег. – 2015. – № 1 (129). – С. 121–128.
27. Холодова М.С., Пастухов М.В., Полетаева В.И. Особенности минерально-вещественного состава твердофазных выпадений снежного покрова территории г. Свирска // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2016. – № 4 (57). – С. 109–118.
28. Украинцев А.В., Плюснин А.М., Жамбалова Д.И. Использование химического состава снега для оценки долгосрочного влияния лесных пожаров на экологическое состояние территорий // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология. – 2016. – № 2. – С. 56–62.
29. Оценка качества атмосферного воздуха сельских населенных пунктов и механизмов его формирования на примере с. Долонь / А.Е. Темиржанова, С.Н. Лукашенко, М.Т. Койгельдинова, Т.Г. Кириллова, А.Ж. Ташекова // Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития: Тезисы докладов VII Международной научно-практической конференции. – Павлодар: Дом печати, 2016. – С. 92.
30. Экологическая характеристика атмосферных взвесей угольных объектов: от места добычи до сжигания / К.С. Голохваст, А.Н. Куприянов, Ю.А. Манаков, А.И. Агошков // Горный журнал. – 2017. – № 4. – С. 87–90.
31. Юдович Я.Э. Ценные элементы-примеси в углях. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.

Поступила 15.10.2020 г.

Информация об авторах

Темиржанова А.Е., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Дюсембаева М.Т., PhD, начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Лукашенко С.Н., доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиохимии и аналитической химии Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии.

Язиков Е.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Шакенов Е.З., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 574:504.3.054:541.182.2

ELEMENTAL COMPOSITION OF SNOW COVER SOLID PHASE IN SMALL SETTLEMENTS (THE CASE OF DOLON VILLAGE, REPUBLIC OF KAZAKHSTAN)

Aray E. Temirzhanova¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Madina T. Dyusembaeva¹,
koigeldinova@nnc.kz

Sergey N. Lukashenko²,
lukashenko.1962@mail.ru

Egor G. Yazikov³,
yazikoveg@tpu.ru

Erbol Z. Shakenov¹,
shakenov@nnc.kz

¹ National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,
2, Beibit Atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

² All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology,
109 km, Kiev highway, Obninsk, 249032, Russia.

³ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this work is caused by the need to expand the methods of complex environmental studies to assess the quality of environmental objects in small communities. The study of the elemental composition of dust and aerosol depositions will provide the most complete picture of the quality status of the main natural components. Air aerosols are a complex dispersed system that includes particles smaller than 10 microns. These particles have both natural and man-made origin: finely dispersed dust particles of soil, plants, microorganisms, soot, ash, components of smoke emissions from boiler houses, industry, etc. Atmospheric air of small settlements remains poorly studied, there are no systematic data on the chemical composition of atmospheric pollutants, and therefore the relevance of this work is determined.

The aim of the research is to determine the elemental composition of the solid phase of the snow cover of a small settlement Dolon.

Objects: dust-aerosol deposition, particulate matter of air aerosols, snow cover, coal and ash.

Techniques: mass spectrometric and atomic emission with inductively coupled plasma (MS-ISP, OES-ISP)

Results. The elemental composition of snow melt water and solid phase of snow was studied. To determine the degree of volatility of chemical elements their coefficient of enrichment from coal to ash was calculated. The main zones with increased content of heavy metals in dust and aerosol depositions were determined. In the snow cover of the investigated territory a group of elements with high migratory capacity was revealed. Maps of the snow cover pollution of the Dolon settlement were constructed with identification of areas (halos of pollution) with increased content of the studied groups of elements.

Key words:

Dust-aerosol deposition, snow cover, solid snow residue, meltwater, dust loading, heavy metals.

REFERENCES

1. Carmagnola C.M., Domine F., Dumont M., Wright P., Strellis B., Bergin M., Dibb J., Picard G., Libois Q., Arnaud L., Morin S. Snow spectral albedo at Summit, Greenland: measurements and numerical simulations based on physical and chemical properties of the snowpack. *The Cryosphere*, 2013, vol. 7, no. 4, pp. 1139–1160.
2. McNeill V.F. Atmospheric aerosols: clouds, chemistry, and climate. *Annual review chemical and biomolecular engineering*, 2017, vol. 8, pp. 427–444. DOI: 10.1146/annurev-chembioeng-060816-101538
3. Kholodov A.S. *Geoekologicheskaya otsenka zagryazneniya atmosfery malykh i srednikh naselennykh punktov Primorskogo kraya mikrorazmernymi chasti*. Dis. Kand. nauk [Geoecological assessment of the atmosphere pollution of small and medium-sized settlements of the Primorsky Krai by micro-dimensional particles. Cand. Diss.]. Vladivostok, 2019. 184 p.
4. Andreyeva I.S., Ankilov A.N., Baklanov A.M., Kutsenogiy K.P. *Aerozoli Sibiri* [Siberian aerosols]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2006. 548 p.
5. Moloczniak A. Qualitative and quantitative analysis of agricultural dust in working environment. *Annals of agricultural environmental medicine*, 2002, vol. 9, no. 1, pp. 71–78.
6. Wang Y., Ying Q., Hu J., Zhang H. Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013–2014. *Environment international*, 2014, vol. 73, pp. 413–422. DOI: 10.1016/j.envint.2014.08.016
7. Elík A. Monitoring of heavy metals in urban snow as indicator of atmosphere pollution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 2002, vol. 82, no. 1, pp. 37–45.
8. Kirillin A.R., Makarov V.N. Geochemistry of snow cover of mountain permafrost landscapes within the Elkon uranium ore district. *Science and education*, 2016, no. 4, pp. 64–69. In Rus.
9. Nesterov E.M., Zarina L.M., Markova M.A., Gracheva I.V., Vorontsova A.V., Makarova Yu.A. Study of ecological condition of the snow cover of St. Petersburg. *Ecological safety of construction and urban economy*, 2019, no. 1, pp. 29–35. In Rus. DOI: 10.24411/1816-1863-2019-11029
10. Mashkin D.V., Guschin A.A., Izvekova T.V., Borovova Yu.G. Experience in the use of snow cover as a universal indicator of

- pollution in urban areas. *Izvestia Irkutsk State University. Series: Biology, Ecology*, 2016, vol. 18, pp. 58–73. In Rus.
11. Filimonova L.M., Bychinskii V.A., Parshin A.V. Air pollution assessment in the area of aluminum production by snow geochemical survey. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2015, no. 10, pp. 75–84. In Rus.
12. He M.Z., Zeng X., Zhang K., Kinney P.L. Fine particulate matter concentrations in urban Chinese cities, 2005–2016: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, vol. 14, no. 2. 191. DOI: 10.3390/ijerph14020191.
13. Hu W., Downward G.S., Reiss B., B.A. Bassig, J. Xu, Hosgood D., Zhang L., Seow W.J., Wu G., Chapman R.S., Tian L., Wei F., Vermeulen R., Lan Q. Personal and indoor PM_{2.5} exposure from burning solid fuels in vented and unvented stoves in a rural region of China with a high incidence of lung cancer. *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 15, pp. 8456–8464. DOI: 10.1021/es502201s
14. Adil'Bayeva T.E., Talovskaya A.V., Yazikov Ye.G., Matveenko I.A. The level of air pollution in the impact zone of coal-fired power plant (Karaganda City) using the data of geochemical snow survey (Republic of Kazakhstan). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2016, vol. 43, no. 1, pp. 1–5.
15. Hu W., Downward G.S., Wong J.Y.Y., Reiss B., Rothman N., Portengen L., Li J., Jones R.R., Huang Y., Yang K., Chen Y., Xu J., He J., Bassig B., Seow W.J., Hosgood H.D., Zhang L., Wu G., Wei F., Vermeulen R., Lan Q. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1:11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2.
16. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology (United Kingdom)*, 2018, vol. 39, no. 18, pp. 2288–2303.
17. Bucko M.S., Magiera T., Johanson B., Petrovsky E., Pesonen L.J. Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 1266–1276.
18. Pozhitkov R.Yu., Moskovchenko D., Kudryavtsev A.A. The geochemistry of snow cover in Nizhnevartovsk. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 6–24. In Rus. DOI: 10.21684/2411-7927-2018-4-1-6-24
19. Weagle C.L., Snider G., Li C., Van Donkelaar A., Philip S., Bissonnette P., Burke J., Jackson J., Latimer R., Stone E., Abboud I., Akoshile C., Anh N.X., Brook J.R., Cohen A., Dong J., Gibson M.D., Griffith D., He K.B., Holben B.N., Kahn R., Keller Ch.A., Kim J.S., Lagrosas N., Lestari P., Khian Ye.L., Liu Y., Marais E.A., Martins J.V., Misra A., Muliane U., Pratiwi R., Quel E.J., Salam A., Segev L., Tripathi S.N., Wang Ch., Zhang Q., Brauer M., Rudich Yi., Martin R.V. Global sources of fine particulate matter: interpretation of PM_{2.5} chemical composition observed by SPARTAN using a global chemical transport model. *Environmental Science and Technology*, 2018, vol. 52, no. 20, pp. 11670–11681. DOI: 10.1021/acs.est.8b01658
20. Genga A., Siciliano T., Siciliano M., Aiello D., Tortorella C. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190, no. 8. 456. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9.
21. Philip S., Martin R.V., van Donkelaar A., Lo J. W., Wang Y., Chen D., Zhang L., Kasibhatla P.S., Wang S., Zhang Q., Lu Z., Streets D.G., Bittman S., Macdonald D.J. Global chemical composition of ambient fine particulate matter for exposure assessment, *Environmental Science and Technology*, 2014, vol. 48, no. 22, pp. 13060–13068. DOI: 10.1021/es502965b
22. Lebedev A.T. *Mass-spektrometriya dlya analiza obyektov okruzhayushchey sredy* [Mass spectrometry for environmental object analysis]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2013. 632 p.
23. Sayet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Achkasov A.I., Basharkovich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Sarkisyan S.Sh., Smirnova R.S., Trefilova N.Ya. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Environmental geochemistry]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
24. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover within the eastern district of Moscow. *Herald of Moscow University. Series 5. Geography*, 2012, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
25. Bogatyrev L.G., Zhilin N.I., Samsonova V.P., Yakushev N.L., Kirillova N.P., Benediktova A.I., Zemskov Ph.I., Karpuhin M.M., Ladonin D.V., Vartanov A.N., Demin V.V. Long-term monitoring of snow cover within natural and urbanized landscapes of the Moscow region. *Herald of Moscow University. Series 5. Geography*, 2018, no. 2, pp. 85–96. In Rus.
26. Blinov S.M., Menshikova E.A., Baturin E.N., Ushakova E.S., Zolotarev L.R. On a snow cover composition in the vicinity of the Verkhnekamsky Salt Deposit. *Ice and snow*, 2015, vol. 1, no. 129, pp. 121–128. In Rus. DOI: 10.15356/IS.2015.01.10
27. Kholodova M.S., Pastukhov M.V., Poletaeva V.I. Features of mineral and material composition of snow cover solid-phase precipitations in the town of Svirsk area. *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits*, 2016, vol. 4, no. 57, pp. 109–118. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-57-4-109-118.
28. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Zhambalova D.I. Use of the snow chemical composition for estimation of the long-term influence of the forest fires on the ecological state of the territories (in Russian). *Bulletin of Voronezh State University, Series: Geography. Geo-ecology*, 2016, no. 2, pp. 56–62. In Rus.
29. Temirzhanova A.E., Lukashenko S.N., Koygeldinova M.T., Kirillova T.G., Tashekova A.Zh. Otsenka kachestva atmosfernogo vozdukha naselennykh punktov i mekhanizmov ego formirovaniya na primere s. Dolon [Assessment of the atmospheric air quality in settlements and mechanisms of its formation on the example of Dolon village]. *Tezisy dokladov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Semipalatinskiy ispytatelnyy poligon. Radiatsionnoe nasledie i perspektivy razvitiya* [Theses of reports of the VII International Scientific and Practical Conference. Semipalatinsk Test Site. Radiation heritage and development prospects]. Pavlodar, Dom pečati Publ., 2016. p. 92.
30. Golokhvast K.S., Kupriyanov A.N., Manakov Yu.A., Agoshkov A.I. Ecological characteristics of the atmospheric weights of the coal objects: from a mining place to burning. *Mining magazine*, 2017, no. 4, pp. 87–90. In Rus.
31. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Tsennyye elementy-primesi v uglyakh* [Valuable trace elements in coal]. Ekaterinburg, UrO RAN, 2006. 538 p.

Received: 15 October 2020.

Information about the authors

Aray E. Temirzhanova, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Madina T. Dyusembaeva, PhD, head of Elemental Analysis Laboratory, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Sergey N. Lukashenko, Dr. Sc., chief researcher, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology.

Egor G. Yazikov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Erbol Z. Shakenov, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

УДК 622.276

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПОГРУЖНЫХ ПЛУНЖЕРНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК С ПНЕВМОКОМПЕНСАТОРАМИ

Уразаков Камил Рахматуллович¹,
urazakk@mail.ru

Тимашев Эдуард Олегович¹,
timashev@mail.ru

Молчанова Вероника Александровна¹,
felix8047@mail.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет,
Россия, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

Актуальность. На сегодняшний день наиболее актуальной задачей механизированной добычи нефти является увеличение рентабельности эксплуатации низко-дебитного и осложненного фонда скважин. Одним из перспективных путей ее решения является совершенствование традиционных и разработка альтернативных технологий эксплуатации, в частности плунжерных насосных установок с погружным приводом. Эффективность работы погружных плунжерных установок в значительной степени определяется нагрузкой, действующей на плунжер насоса. Существенный рост циклических переменных нагрузок на плунжер и привод обусловлен колебаниями давления в насосно-компрессорных трубах, возникающими вследствие неравномерной подачи насоса. Вышесказанное обуславливает актуальность разработки методов и технологий снижения колебаний (пульсаций) давления в насосно-компрессорных трубах погружных плунжерных установок.

Объект: установка насосная плунжерная с погружным приводом, оборудованная пневматическими компенсаторами давления (пневмокомпенсаторами), работающая в стендовой скважине. Пневмокомпенсаторы представляют собой устройства, предназначенные для создания равномерного течения жидкости в насосно-компрессорных трубах.

Цель: исследование эффективности пневмокомпенсаторов в составе плунжерных насосных установок с погружным приводом, анализ влияния технологических и геометрических параметров пневмокомпенсаторов на эффективность сглаживания колебаний давления и скорости потока в насосно-компрессорных трубах.

Методы: разработка аналитической математической модели работы погружной плунжерной установки в стендовой скважине; проведение численных экспериментов для выявления закономерностей влияния технологических параметров пневмокомпенсаторов на эффективность их работы; физическое моделирование работы погружной плунжерной установки на стендовой скважине.

Результаты. Получено аналитическое выражение, позволяющее для заданного закона изменения подачи насоса и энергоёмкости системы пневмокомпенсаторов рассчитать динамику давления в насосно-компрессорных трубах. В результате моделирования работы погружной плунжерной установки в стендовой скважине получена теоретическая барограмма изменения давления в насосно-компрессорных трубах в течение цикла откачки, которая хорошо согласуется с фактической барограммой. Моделированием работы погружной плунжерной установки, оборудованной пневмокомпенсаторами, показано значительное, практически на порядок, снижение пульсаций давления в насосно-компрессорных трубах и нагрузок на плунжер и привод. Проанализировано влияние суммарного объема и давления зарядки пневмокомпенсаторов на эффективность их работы. Даны практические рекомендации по расчету оптимального давления зарядки пневмокомпенсаторов.

Ключевые слова:

Установка насосная плунжерная с погружным приводом, пневмокомпенсатор, технологические параметры пневмокомпенсатора, колебания давления, давление зарядки, рабочая камера пневмокомпенсатора.

Введение

На сегодняшний день в связи с переходом ряда ведущих месторождений России на завершающую стадию эксплуатации одной из ключевых тенденций механизированной добычи нефти является снижение дебитов и рост осложненного фонда скважин. К основным факторам, осложняющим эксплуатацию скважин, следует отнести: низкое пластовое давление и продуктивность коллекторов, высокую вязкость нефти, интенсивное отложение парафинов в узлах внутрискважинного оборудования, что особенно актуально при разработке трудноизвлекаемых запасов. Традиционные способы эксплуатации данных категорий скважин – штанговыми насосными установками (УСШН) и установками электроцентробежного насоса (УЭЦН) – в ряде случаев оказываются нерентабельными [1–3].

Один из перспективных путей повышения рентабельности и эффективности механизированной нефтедобычи – использование плунжерных установок с погружным приводом, в частности, с линейным двигателем (УПЛД). Использование погружного привода в составе с плунжерным насосом позволяет преодолеть недостатки существующих способов эксплуатации, в частности, низкий коэффициент полезного действия (КПД) УЭЦН в области низкого (до 40 кубических метров в сутки) дебита, ограничения по глубине спуска и кривизне скважин, характерные для штанговых установок в связи с наличием штанговой колонны. Однако, несмотря на вышеприведенные достоинства, процесс откачки пластового флюида УПЛД также сопровождается осложнениями в работе насосной установки. Поскольку плунжерный насос в

составе УПЛД является насосом одностороннего действия, его подача является неравномерной: подъем жидкости в насосно-компрессорных трубах (НКТ) осуществляется только в полцикле хода плунжера вверх, при ходе плунжера вниз подача насоса отсутствует. Колебания скорости жидкости в НКТ в процессе работы УПЛД обуславливают возникновение колебаний (пульсаций) давления в НКТ, возникающих за счет действия сил гидродинамического трения жидкости о стенки труб. Пульсации давления, в свою очередь, вызывают рост циклических переменных нагрузок, действующих на плунжер насоса и привод, что ведет к снижению надежности работы привода и росту потребляемой электроэнергии [4–10].

Для снижения колебаний давления при откачке жидкости плунжерными насосами могут быть использованы пневматические компенсаторы давления – пневмокомпенсаторы (ПК). В нефтепромысловой практике широкое распространение получили пневмокомпенсаторы в составе буровых насосных установок, также известен опыт применения ПК при добыче нефти штанговыми установками. Принцип работы пневмокомпенсаторов основан на снижении амплитуды колебаний давления путем выравнивания скорости потока жидкости в НКТ. Теоретический расчет технологических параметров пневмокомпенсаторов основан на определении объема жидкости, который принимает и затем отдает рабочая камера ПК таким образом, что скорость потока в НКТ остается постоянной величиной. Эффективность работы ПК в значительной степени определяется обоснованным расчетом технологических параметров. Для исследования эффективности пневматических компенсаторов в составе плунжерных установок с погружных линейным приводом, анализа влияния технологических и геометрических параметров пневмокомпенсаторов на эффективность сглаживания колебаний давления и скорости потока в НКТ разработана методика проведения лабораторных экспериментов. Эксперименты проводятся на специализированной стендовой скважине [11–13].

Стенд для моделирования работы УПЛД с пневмокомпенсаторами

Стенд представляет собой вертикальную скважину, оборудованную насосной установкой с погружным приводом УПЛД. В качестве привода используется погружной линейный магнитоэлектрический двигатель. В колонне НКТ устанавливаются пневмокомпенсаторы. Кроме того, установка включает следующие элементы: НКТ, обсадные трубы, станция управления, приборный щит, трансформатор, диафрагма, манометры, датчик давления, датчик расхода, счетчики активной и реактивной электроэнергии [14–17]. Схема установки приведена на рис. 1.

Принцип работы насосной установки: плунжер приводится в движение погружным линейным магнитоэлектрическим двигателем со станции управления. Объемный расход жидкости в НКТ зависит от диаметра плунжера, длины хода и частоты качаний (числа двойных ходов в минуту) плунжерного насоса.

НКТ дополнительно оборудуются пневмокомпенсатором (пневмокомпенсаторами). Конструктивно пневмокомпенсатор представляет собой газовую и рабочую камеры, разделенные непроницаемой подвижной стенкой, например, эластичной диафрагмой. Газовая камера пневмокомпенсатора заполнена газом под определенным давлением, рабочая камера сообщается с полостью НКТ. При возрастании скорости потока и давления в НКТ и рабочей камере ПК, гидродинамически связанной с полостью НКТ, объем газовой камеры снижается, при этом часть жидкости поступает в освободившийся объем рабочей камеры ПК. При снижении скорости потока и давления сжатый газ вытесняет порцию жидкости в полость НКТ. В результате выше места установки пневмокомпенсатора достигается выравнивание скорости жидкости в НКТ и снижение колебаний давления (рис. 2).

Устье скважины герметизируется, а также предусматривается система, обеспечивающая циркуляцию жидкости в скважине. Система циркуляции состоит из нагнетательной линии с расходомером и манометром, регистрирующими соответственно скорость потока и давление на устье. Для регулирования давления в НКТ и нагнетательной линии на устье скважины устанавливается штуцер, причем величина устьевого давления регулируется изменением диаметра штуцера. Дополнительные гидравлические сопротивления движению жидкости в НКТ (эквивалентные гидродинамическому трению жидкости в НКТ) за счет размещения на устье штуцера малого проходного сечения создаются ввиду небольшой глубины скважины (порядка 10 м) для моделирования промысловых условий работы УПЛД.

Для регистрации пульсаций давления в обсадной колонне на приеме насоса и в НКТ устанавливаются соответствующие датчики давления (манометры). Показания датчиков выводятся на прибор регистрации давления в станции управления. Числовые величины технологических и технических параметров стенда представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры стенда

Table 1. Bench parameters

	Величина Value
Свойства флюида Fluid properties	
Плотность, кг/м ³ /Density, kg/m ³	900
Вязкость, мПа*с/Viscosity, mPa*s	100
Параметры скважины Well parameters	
Внутренний диаметр НКТ, мм Tubing inner diameter, mm	60
Диаметр насоса, мм/Pump diameter, mm	32
Глубина спуска, м/Depth of pump descent, m	10
Технологические параметры Technological parameters	
Длина хода, м/Stroke length, m	1,230
Число качаний в минуту Number of swings per minute	8
Формирование устьевого давления Wellhead pressure formation	
Диаметр проходного сечения штуцера, мм Fitting passage section diameter, mm	2

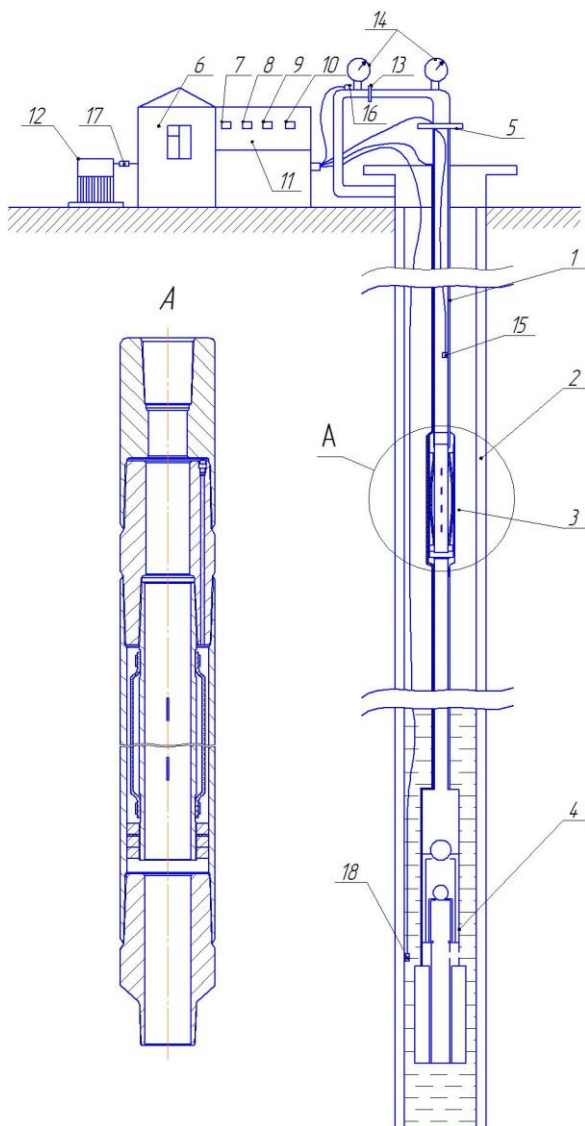


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – насосно-компрессорные трубы, 2 – обсадные трубы, 3 – пневмокомпенсатор (-ы), 4 – плунжерный насос с погружным линейным двигателем, 5 – датчик давления в обсадной колонне на приеме насоса, 6 – станция управления, 7 – прибор регистрации потребления мощности, 8 – прибор регистрации давления в обсадной колонне на приеме насоса, 9 – прибор регистрации расхода на устье скважины, 10 – прибор регистрации давления на устье скважины, 11 – приборный щит, 12 – трансформатор, 13 – штуцер, 14 – манометры, 15, 18 – датчик давления, 16 – датчик расхода, 17 – счетчик активной и реактивной электроэнергии

Fig. 1. Scheme of the experimental bench: 1 – tubing pipe, 2 – casing pipes, 3 – pneumatic compensator (s), 4 – plunger pump with downhole linear motor, 5 – pressure sensor at the pump reception, 6 – control station, 7 – power consumption registration device, 8 – pressure registration device at the pump reception, 9 – flow registration device at the wellhead, 10 – wellhead pressure registration device, 11 – instrument panel, 12 – transformer, 13 – fitting, 14 – pressure gauges, 15, 18 – pressure sensor, 16 – flow sensor, 17 – active and reactive electricity meter

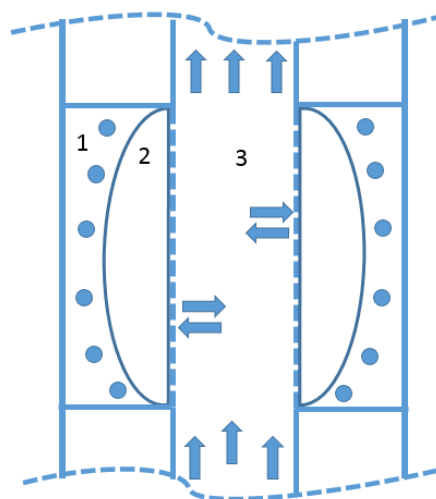


Рис. 2. Схема пневмокомпенсатора (1 – газовая камера ПК, 2 – рабочая камера ПК, 3 – полость НКТ, стрелками показаны возможные направления потоков)

Fig. 2. Pneumatic compensator design (1 – PC gas chamber, 2 – PC working chamber, 3 – tubing cavity, arrows show possible flow direction)

Математическая модель работы погружной плунжерной установки с пневмокомпенсаторами

В общем случае расчет течения жидкости в НКТ базируется на совместном решении уравнений сохранения импульса и энергии (уравнений Навье–Стокса). Поскольку глубина спуска насоса для стендовой скважины является небольшой (10 м), влиянием нестационарного и инерционного слагаемых в уравнениях можно пренебречь. Полагая режим течения в НКТ ламинарным и определяя касательные напряжения на стенке трубы согласно формуле Пуазейля–Гагена, закон сохранения импульса можно переписать в виде [17]

$$\frac{dp}{dz} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{\rho v^2}{2d_t} - \rho g_z, \quad (1)$$

где p – давление, Па; z – координата вдоль ствола скважины, направлена вертикально вверх, м; v – скорость жидкости в НКТ, м/с; Re – число Рейнольдса; d_t – внутренний диаметр НКТ, мм; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g_z – ускорение свободного падения, м/с².

Скорость движения жидкости в НКТ определяется скоростью движения плунжера насоса, а также обменными массовыми потоками между полостью НКТ и рабочей камерой пневмокомпенсаторов, рассчитываемыми согласно следующей зависимости, полученной в предположении изотермического характера расширения и сжатия газовой камеры пневмокомпенсатора:

$$v = \frac{1}{S_t} \left(Q_{\text{pump}}(t) - \frac{p_0 V_0}{p^2} \frac{dp}{dt} \right), \quad (2)$$

где $Q_{\text{pump}}(t)$ – закон изменения во времени подачи насоса, м³/с; p – давление в газовой камере, Па; p_0 , V_0 – начальное давление (Па) и объем (м³) газовой

камеры соответственно; S_t – площадь внутреннего поперечного сечения НКТ, м^2 .

Дополнительные гидравлические сопротивления, возникающие на устьевом штуцере, рассчитываются согласно зависимости [18, 19]

$$\Delta p = \varepsilon \frac{\rho v^2}{2}, \quad (3)$$

где ε – коэффициент местных гидравлических сопротивлений для штуцера.

Совместным решением (1)–(3) получено выражение для расчета производной давления в НКТ (в нижней части колонны НКТ, прилегающей к насосу):

$$\frac{dp_{out}}{dt} = \frac{Q_{pump}(t)}{U_0} p_{out}^2 - \frac{S_t p_{out}^2}{U_0} \times \left(\frac{-32\mu L}{\varepsilon \rho d_t^2} + \frac{1}{\varepsilon \rho} \sqrt{\left(\frac{32\mu L}{d_t^2} \right)^2 + 2\varepsilon \rho (p_{out} - p_s)} \right), \quad (4)$$

где p_{out} – давление в нижней части НКТ, Па; $U_0 = p_0 V_0$ – энергоемкость системы ПК, Дж; μ – динамическая вязкость жидкости в НКТ, Па·с; p_s – статическое давление в жидкости в нижней части НКТ, Па; L – длина колонны насосно-компрессорных труб, м.

Динамика изменения давления в нижней части НКТ для насосной установки, оборудованной пневмокомпенсаторами энергоемкостью U_0 , рассчитывается численным решением (4) для произвольного закона изменения подачи насоса $Q_{pump}(t)$.

Моделирование работы погружной плунжерной установки и обоснование эффективности пневмокомпенсаторов

В результате моделирования работы УПЛД в стендовой скважине (без пневмокомпенсаторов) получена теоретическая барограмма изменения давления в НКТ в течение цикла откачки, которая хорошо согласуется с фактической барограммой (рис. 3). Отклонение кривых не превышает 4 %, что свидетельствует об адекватности моделирования. Амплитуда колебаний давления в НКТ составляет порядка 13 МПа, что обусловлено главным образом значительными гидравлическими сопротивлениями, развиваемыми при течении жидкости через устьевой штуцер.

Моделирование работы УПЛД, оборудованной пневмокомпенсаторами, показало значительное снижение пульсаций давления в НКТ и нагрузок на плунжер и привод (табл. 2). Расчетные технологические параметры пневмокомпенсаторов представлены в табл. 3.

Эффективность снижения колебаний давления определяется двумя ключевыми параметрами: давлением и объемом газа в газовой камере ПК, причем эти величины непрерывно изменяются в течение цикла работы плунжерного насоса УПЛД. В качестве анализируемых и контролируемых технологических параметров рассматриваются: давление зарядки пневмокомпенсаторов (давление предварительно закачиваемого на поверхности газа в ПК) и суммарный объем пневмокомпенсаторов (под объемом одного ПК пони-

мается максимальный возможный объем газовой камеры ПК, определяемый его геометрическими характеристиками). Результирующий объем ПК регулируется изменением количества пневмокомпенсаторов стандартного образца, устанавливаемых в скважину. В качестве стандартного образца ПК рассматривается цилиндрический коаксиальный диафрагменный пневмокомпенсатор, подвижный элемент которого (эластичная упругая диафрагма) перемещается в пространстве между НКТ и внешней трубой (рис. 2).

Таблица 2. Показатели работы погружной плунжерной установки

Table 2. Performance indicators of downhole plunger installations

Показатель/Index	УПЛД без ПК DPI without pneumatic compensators	УПЛД с ПК DPI with pneumatic compensators
Максимальное давление в НКТ, МПа Maximum pressure in the tubing, MPa	12,7	2,0
Среднее давление за цикл откачки, МПа Average pressure during the pumping cycle, MPa	2,5	1,6
Максимальная нагрузка на плунжер, кН Maximum load on the plunger, kN	10,4	1,6
Средняя за цикл нагрузка на плунжер, кН Average per cycle load on the plunger, kN	2,0	1,3

Таблица 3. Технологические параметры пневмокомпенсаторов

Table 3. Technological parameters of pneumatic compensators

Показатель/Index	Значение/Value
Давление зарядки пневмокомпенсаторов, МПа Charging pressure of pneumatic compensators, MPa	1
Количество пневмокомпенсаторов Number of pneumatic compensators	6
Объем одного пневмокомпенсатора, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$ Volume of the one pneumatic compensator, $\text{м}^3 \cdot 10^{-3}$	0,5
Интервал размещения пневмокомпенсаторов Placement interval of pneumatic compensators	Последовательно, в нижней части НКТ In series, at the bottom of the tubing

С увеличением суммарного объема ПК возрастает энергоемкость системы пневмокомпенсаторов, амплитуда колебаний и максимальная величина давления закономерно снижаются (рис. 4), причем по мере роста количества ПК темп сглаживания пульсаций давления снижается. В частности, при увеличении количества ПК в системе с 1 до 2 максимальная величина давления уменьшается более чем в 2 раза – с 7 до 3 МПа, при увеличении с 3 до 6 ПК – на 20 %, с 2,5 до 2 МПа. Следует отметить, что подача плунжерного насоса за один цикл составляет порядка $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ (1 л,

что соответствует объему 2 ПК). Из графиков на рис. 4 видно, что существенное сглаживание колебаний давления (кривые 2–4) достигается в случаях, когда суммарный объем пневмокомпенсаторов близок к подаче насоса за цикл или кратно превышает ее. Оценка количества и суммарного объема пневмокомпенсаторов, устанавливаемых в скважину, может проводиться с использованием уравнения для изотермического сжатия газа в газовых камерах ПК:

$$V_0 = \Delta V \left(1 + \frac{P_0}{\Delta P} \right), \quad (5)$$

где ΔP , ΔV – изменение давления (Па) и объема (м^3) газовых камер.

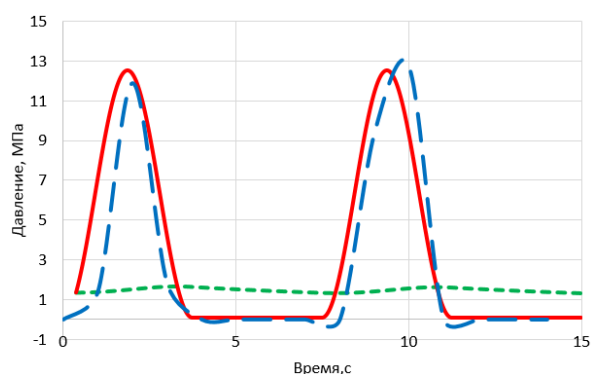


Рис. 3. Барограммы в насосно-компрессорных трубах (сплошная линия – модель, длинный штрих – фактическая, короткий штрих – модельная, погружная плунжерная установка с пневмокомпенсаторами)

Fig. 3. Barograms in tubing (solid line – model, long bar – actual, short bar – model, downhole plunger installations with pneumatic compensators)

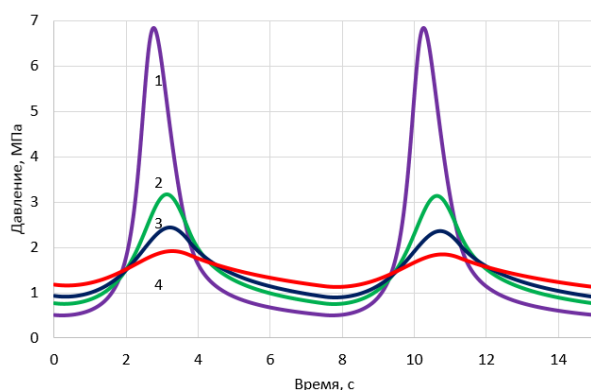


Рис. 4. Модельные барограммы в насосно-компрессорных трубах при различном суммарном количестве пневмокомпенсаторов в системе (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 6 пневмокомпенсаторов)

Fig. 4. Model barograms in the tubing with different total number of pneumatic compensators in the system (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 6 pneumatic compensators)

Поскольку с увеличением суммарного объема ПК постепенно снижается амплитуда колебаний давления, уменьшается и рабочий ход диафрагмы, а также эффективный объем жидкости, принимаемый ПК. В результате увеличение количества ПК не приводит

к пропорциональному снижению амплитуды колебания давления. Напротив, связь между этими двумя величинами близка к гиперболической. Согласно формуле (5) для полного выравнивания пульсаций давления в НКТ количество и суммарный объем пневмокомпенсаторов должны стремиться к бесконечности (рис. 5).

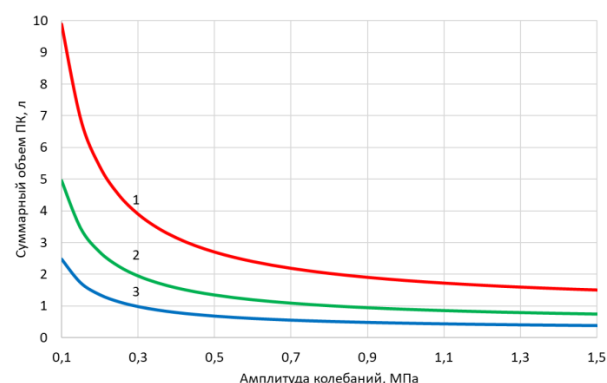


Рис. 5. Расчетная зависимость суммарного объема ПК, требуемого для достижения заданной амплитуды колебаний давления после сглаживания (1 – подача насоса за цикл 2 л, 2 – 1 л, 3 – 0,5 л)

Fig. 5. Calculated dependence of the total PC volume required to achieve the specified amplitude of pressure oscillations after smoothing (1 – pump supply per cycle 2 л, 2 – 1 л, 3 – 0,5 л)

Характер влияния давления зарядки пневмокомпенсаторов на конфигурацию барограмм показан на рис. 6. Вначале рост давления зарядки с 0,5 до 1 МПа (от кривой 2 к кривой 4 на рис. 6) приводит к снижению амплитуды колебаний давления: при чрезмерно низком давлении зарядки давление жидкости в насосно-компрессорных трубах, в течение цикла откачки превышающее давление зарядки, обуславливает постоянное сжатие газовой камеры, следовательно, снижение рабочего хода диафрагмы ПК и эффективного объема жидкости, принимаемой ПК. При росте давления зарядки с 1 до 1,5 МПа (от кривой 4 к кривой 3 на рис. 6) амплитуда колебаний давления возрастает, причем форма барограммы претерпевает значительные изменения. В процессе снижения давления в НКТ в полцикле всасывания (ход плунжера вниз) подача насоса отсутствует, движение потока в НКТ обеспечивается исключительно за счет вытеснения жидкости из рабочей камеры ПК сжатым газом. Однако если давление в НКТ становится ниже давления зарядки ПК, в процессе расширения газовой камеры диафрагма полностью прилегает к внутренней стенке пневмокомпенсатора, и его подача прекращается. Поскольку подача и насоса, и ПК равны нулю, прекращается движение жидкости в насосно-компрессорных трубах, и давление в НКТ снижается до статического. В дальнейшем в начале полцикла нагнетания (ход плунжера вверх) пневмокомпенсатор не принимает жидкость до тех пор, пока давление в НКТ не превысит давление зарядки ПК. Таким образом, чрезмерно высокое давление зарядки, так же, как и чрезмерно низкое, оказывает отрицательное влия-

ние на эффективность работы ПК. Исходя из выше-сказанного, оптимальное давление зарядки рационально устанавливать равным минимальному давлению в НКТ в течение цикла откачки.

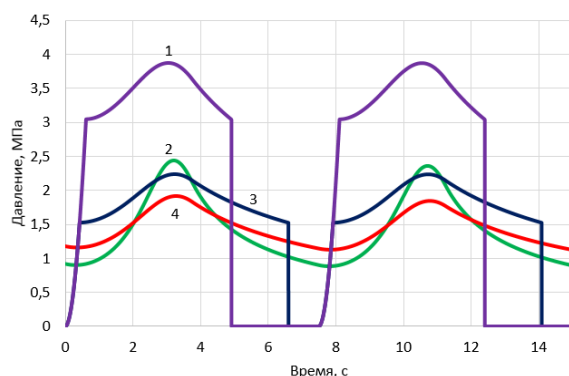


Рис. 6. Модельные барограммы в насосно-компрессорных трубах при различном давлении зарядки пневмокомпенсаторов, МПа: 1) 3; 2) 0,5; 3) 1,5; 4) 1

Fig. 6. Model barograms in tubing at different charging pressure of pneumatic compensators, MPa: 1) 3; 2) 0,5; 3) 1,5; 4) 1

Следует отметить, что существующие методы расчета технологических параметров пневмокомпенсаторов не учитывают рассмотренных выше физических принципов формирования колебаний скорости потока и давления в трубах при работе ПК. В частности, в [20] давление зарядки ПК рекомендуется принимать равным статическому давлению на глубине его установки. Расчет технологических параметров пневмокомпенсаторов с учетом приведенных в статье рекомендаций позволит обеспечить максимальную энергоемкость пневмокомпенсаторов и оптимальные условия их работы.

Выводы

1. Разработана математическая модель течения жидкости в подъемных трубах плунжерной насосной

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиляев Г.Г., Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р. Современные методы насосной добычи нефти. – Уфа: Восточная печать, 2016. – 410 с.
2. Эксплуатация скважин установками штанговых насосов на поздней стадии разработки нефтяных месторождений / В.М. Валовский, К.М. Валовский, Г.Ю. Басов, Н.Г. Ибрагимов, В.Г. Фадеев, А.В. Артюхов. – М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2016. – 592 с.
3. Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells / T.A. Aliev, A.H. Rzayev, G.A. Guluyev, T.A. Alizada, N.E. Rzayeva // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – V. 99. – P. 47–56.
4. Kolawole O., Gamadi T., Bullard D. Comprehensive review of artificial lift system applications in tight formations // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 196592, SPE Eastern Regional Meeting. – Charleston, West Virginia, USA, 15–17 October 2019. – P. 1–21.
5. Valeev A.R., Zotov A.N., Kharisov Sh.A. Application of disk springs for manufacturing vibration isolators with quasi-zero stiffness // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – V. 51. – № 3. – P. 194–200.
6. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study / B. Hansen, B. Tolbert, C. Vernon, J.D. Hedengren // Computers and Chemical Engineering. – 2019. – V. 121. – P. 265–284.

установки с погружным (линейным) приводом, оборудованной системой пневматических компенсаторов, для стеновой скважины. Получено аналитическое выражение, которое позволяет для произвольного закона изменения подачи насоса и заданной энергоемкости системы пневмокомпенсаторов рассчитать динамику давления в насосно-компрессорных трубах.

2. В результате моделирования работы погружной плунжерной установки в стеновой скважине (без пневмокомпенсаторов) получена теоретическая барограмма изменения давления в насосно-компрессорных трубах в течение цикла откачки, которая хорошо согласуется с фактической барограммой (отклонение кривых не превышает 4 %).
3. Моделирование работы погружной плунжерной установки, оборудованной пневмокомпенсаторами, показало значительное снижение пульсаций давления в насосно-компрессорных трубах и нагрузок на плунжер и привод: максимальное давление в насосно-компрессорных трубах и максимальная нагрузка на плунжер снизились практически на порядок, в 6 раз. Показано, что степень сглаживания пульсаций давления возрастает с увеличением суммарного объема газовых камер пневмокомпенсаторов, т. е. с увеличением количества пневмокомпенсаторов, причем по мере роста количества пневмокомпенсаторов темп сглаживания пульсаций давления снижается.
4. Показан нелинейный характер влияния давления зарядки пневмокомпенсаторов на эффективность их работы. Чрезмерно высокое давление зарядки, так же, как и чрезмерно низкое, оказывает отрицательное влияние на эффективность работы пневмокомпенсаторов. Оптимальное давление зарядки рекомендуется устанавливать равным минимальному давлению в насосно-компрессорных трубах в течение цикла откачки.

7. Application of low-carbon, rodless artificial lift in low-production, low-permeability oilfields / Sh. Zhu, D. Lei, H. Liu, Zh. Hao, L. Zhang // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 192071, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Brisbane, Australia, 23–25 October 2018. – P. 1–11.
8. A unique Electrical Submersible Reciprocating Pumping (ESRP) system design applied in unconventional oilfield / W. Zhang, L. Wang, F. Wang, Y. Huang, G. Cao, F. Zhang, H. Ren, J. Ge, W. Zhang, L. Liu, X. Wang // SPE (Society of Petroleum Engineers) – 153123, SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – San Antonio, Texas, USA, 8–10 October 2012. – P. 1–6.
9. Bhandari V.B. Introduction to machine design. – New York City: Tata McGraw-Hill Education, 2013. – 645 p.
10. Gabor T. Sucker-rod pumping handbook: production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping. – Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2015. – 585 p.
11. Gabor T. Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance. – Houston, Texas: Gulf Professional Publishing, 2017. – 562 p.
12. Шулаков Н.В., Шутемов С.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов // Фундаментальные исследования. – 2016. – Т. 4. – № 12. – С. 795–799.
13. Optimization and application of reciprocating direct-drive electric submersible plunger pump lifting system in the xinjiang oilfield /

- D. Lei, X. Huang, H. Zhang, M. Yao, R. Chen, J. Liu // The Open Chemical Engineering Journal. – 2019. – V. 13. – № 1. – P. 68–80.
14. Погружная бесштанговая насосная установка: пат. Рос. Федерация, № 2669418, заявл. 28.11.2017; опубл. 11.10.2018. Бюл. № 29. – 5 с.
15. Development and application of throwing-in and pulling reciprocating direct-drive electric submersible plunger pump / X.D. Huang, M.C. Yao, D.R. Lei, X. Li, H. Zhang, R.X. Chen, H. Meng // Drilling & Production Technology. – 2018. – V. 41. – № 2. – P. 82–84.
16. Li W.W. The applicability evaluation of electric submersible plunger pump technology in low production block // Proceeding of Oil production engineering. – 2017. – V. 1. – P. 43–47.
17. Тимашев Э.О., Уразаков К.Р. Динамика скорости потока и давления в насосно-компрессорных трубах установок плунжерных насосов с погружным приводом // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – № 4. – С. 82–88.
18. Brill J.P., Mukherjee H. Multiphase flow in wells. – Richardson, Texas: Society of petroleum engineers, 1999. – 384 p.
19. Двухуровневый метод диагностики технического состояния штанговых насосных установок / Р.Н. Бахтизин, К.Р. Уразаков, С.Ф. Исмагилов, Ф.Ф. Давлетшин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – № 2. – С. 188–198.
20. Зотов А.Н., Тимашев Э.О., Уразаков К.Р. Методы гашения колебаний давления на устье штанговых установок // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 6. – С. 56–64.

Поступила: 24.04.2020 г.

Информация об авторах

Уразаков К.Р., доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Тимашев Э.О., кандидат технических наук, докторант кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

Молчанова В.А., кандидат технических наук, доцент кафедры машин и оборудования нефтегазовых промыслов Уфимского государственного нефтяного технического университета.

UDC 622.276

SIMULATION OF OPERATION OF DOWNHOLE PLUNGER PUMPING INSTALLATIONS WITH PNEUMATIC COMPENSATORS

Kamil R. Urazakov¹,
Urazakk@mail.ru

Eduard O. Timashev¹,
timashev@mail.ru

Veronika A. Molchanova¹,
felix8047@mail.ru

¹ Ufa State Petroleum Technological University,
1, Kosmonavtov street, Ufa, 450062, Russia.

Relevance. To date, the most urgent task of mechanized oil production is to increase the profitability of operation of low-debit and complicated well stock. One of the promising ways to solve this problem is to improve traditional and develop alternative operating technologies, in particular, plunger pumping units with downhole drive. The efficiency of downhole plunger installations is largely determined by the load acting on the pump plunger. A significant increase in cyclic variable loads on the plunger and drive is due to pressure fluctuations in the lift pipes, resulting from uneven pump supply. The above causes the relevance of the development of methods and technologies for reducing pressure pulsations in the lift pipes of downhole plunger installations.

Object: pump plunger installation with downhole drive, equipped with pneumatic pressure compensators (pneumatic compensators), working in the bench well. Pneumatic compensators are devices designed to create a uniform flow of liquid in lift pipes.

Purpose: to study the effectiveness of pneumatic compensators as part of plunger pumping units with downhole drive, to analyze the influence of technological and geometric parameters of pneumatic compensators on the effectiveness of smoothing pressure fluctuations and flow rate in lift pipes.

Methods: development of an analytical mathematical model of the downhole plunger installation in a bench well; numerical experiments to identify patterns of influence of the technological parameters of pneumocompensators on their performance; physical modelling of downhole plunger installation in a bench hole.

Results. The authors have obtained the analytical expression that allows calculating the pressure dynamics in the lift (tubing) pipes for a given law of change in the pump supply and energy intensity of the pneumatic compensator system. As a result of modeling the operation of a downhole plunger installation in a bench well, a theoretical barogram of the pressure change in the tubing during the pumping cycle is obtained, which is in good agreement with the actual barogram. Simulation of the operation of the downhole plunger installation equipped with pneumatic compensators shows a significant, almost an order of magnitude, reduction of pressure pulsations in the tubing and loads on the plunger and drive. The influence of the total volume and charging pressure of pneumatic compensators on the efficiency of their operation is analyzed. Practical recommendations for calculating the optimal charging pressure of pneumatic compensators are given.

Key words:

Plunger pump installation with downhole drive, pneumatic compensator, technological parameters of the pneumatic compensator, pressure oscillation, charging pressure, working chamber of the pneumatic compensator.

REFERENCES

- Gilaev G.G., Bakhtizin R.N., Urazakov K.R. *Sovremennye metody nasosnoy dobychi nefi* [Modern methods of pumping oil production]. Ufa, Vostochnaya pechat Publ., 2016. 410 p.
- Valovskii V.M., Valovskii K.M., Basos G.Yu., Ibragimov N.G., Fadeev V.G., Artyukhov A.V. *Ekspluatatsiya skvazhin ustanovkami shtangovykh nasosov na pozdney stadii razrabotki nefyanykh mestorozhdeniy* [Well operation by installation of rod pumps in the late stages of development of oil fields]. Moscow, Neftyanoe khozyaistvo Publ., 2016. 592 p.
- Aliev T.A., Rzaev A.H., Guluyev G.A., Alizada T.A., Rzaeva N.E. Robust technology and system for management of sucker rod pumping units in oil wells. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, vol. 99, pp. 47–56.
- Kolawole O., Gamadi T., Bullard D. Comprehensive review of artificial lift system applications in tight formations. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 196592, SPE Eastern Regional Meeting*, Charleston, West Virginia, USA, 15–17 October 2019, pp. 1–21.
- Valeev A.R., Zotov A.N., Kharisov Sh.A. Application of disk springs for manufacturing vibration isolators with quasi-zero stiffness. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 194–200.
- Hansen B., Tolbert B., Vernon C., Hedengren J.D. Model predictive automatic control of sucker rod pump system with simulation case study. *Computers and Chemical Engineering*, 2019, vol. 121, pp. 265–284.
- Zhu Sh., Lei D., Liu H., Hao Zh., Zhang L. Application of low-carbon, rodless artificial lift in low-production, low-permeability oilfields. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 192071, SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Brisbane, Australia, 23–25 October 2018, pp. 1–11.
- Zhang W., Wang L., Wang F., Huang Y., Cao G., Zhang F., Ren H., Ge J., Zhang W., Liu L., Wang X. A unique Electrical Submersible Reciprocating Pumping (ESRP) system design applied in unconventional oilfield. *SPE (Society of Petroleum Engineers) – 153123, SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. San Antonio, Texas, USA, 8–10 October 2012, pp. 1–6.
- Bhandari V.B. *Introduction to machine design*. New York City, Tata McGraw-Hill Education, 2013. 645 p.
- Gabor T. *Sucker-rod pumping handbook: production engineering fundamentals and long-stroke rod pumping*. Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2015. 585 p.
- Gabor T. *Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance*. Houston, Texas, Gulf Professional Publishing, 2017. 562 p.
- Shulakov N.V., Shutemov S.V. Prospects for the use of a cylindrical linear valve motor as a drive for plunger oil production units. *Fundamental Research*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 795–799. In Rus.
- Lei D., Huang X., Zhang H., Yao M., Chen R., Liu J. Optimization and application of reciprocating direct-drive electric submersible

- plunger pump lifting system in the Xinjiang oilfield. *The Open Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 68–80.
14. Vdovin E.Yu., Lokshin L.I., Lurie M.A., Oshmarin N.S., Timashev E.O. Vdovin E.Yu., Lokshin L.I., Lur'e M.A., Oshmarin N.S., Timashev E.O. Pogruzhnaya besshtangovaya nasosnaya ustanovka [Submersible rodless pump unit]. Patent RF, no. 2669418, 2018.
 15. Huang X.D., Yao M.C., Lei D.R., Li X., Zhang H., Chen R.X., Meng H. Development and application of throwing-in and pulling reciprocating direct-drive electric submersible plunger pump. *Drilling & Production Technology*, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 82–84.
 16. Li W.W. The applicability evaluation of electric submersible plunger pump technology in low production block. *Proceeding of Oil production engineering*, 2017, vol. 1, pp. 43–47.
 17. Urazakov K.R., Timashev E.O. Dynamics of flow rate and pressure in the tubing of plunger pumps with downhole drive. *Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products*, 2019, no. 4, pp. 45–55. In Rus.
 18. Brill J.P., Mukherjee H. *Multiphase flow in wells*. Richardson, Texas, Society of petroleum engineers, 1999. 384 p.
 19. Bakhtizin R.N., Urazakov K.R., Ismagilov S.F., Davletshin F.F. Two-level method for diagnosing technical condition of sucker-rod pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 2, pp. 188–198. In Rus.
 20. Zotov A.N., Timashev E.O., Urazakov K.R. Methods of pressure damping upon the ostium of sucker rod pumps. *Petroleum Engineering*, 2018, vol. 16, no. 6, pp. 56–64. In Rus.

Received: 24 April 2020.

Information about the authors

Kamil R. Urazakov, Dr. Sc., professor, Ufa State Petroleum Technological University.

Eduard O. Timashev, Cand. Sc., doctoral candidate, Ufa State Petroleum Technological University.

Veronika A. Molchanova, Cand. Sc., associate professor, Ufa State Petroleum Technological University.

УДК 575.224.23:616-001.3

ЗАГРЯЗНЕНИЕ НЕФТЬЮ И СОПУТСТВУЮЩИМИ ТЯЖЕЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ, РАДИОНУКЛИДАМИ И НАКОПЛЕНИЕ В ОРГАНИЗМЕ ГИДРОБИОНТОВ КАЗАХСТАНСКОЙ ЗОНЫ КАСПИЯ

Бигалиев Айтхажа Бигалиевич¹,
aitkhazha@gmail.com

Кожамметова Айзада Нурахметовна¹,
ayzada.1983@mail.ru

¹ Казахский национальный университета имени аль-Фараби,
Казахстан, 050040, г. Алматы, пр. аль-Фараби, 71,

Актуальность. Состояние экологической системы Каспийского моря и прибрежной зоны характеризуется как неблагоприятное. В ближайшей перспективе возможно резкое увеличение экологической нагрузки не только на казахстанской части Прикаспийского региона, но и по всей акватории средней и северной части моря. Причиной является интенсивное освоение нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе Каспия (Кашаган). В составе добываемой нефти содержатся полиароматические углеводороды, представляющие широкий класс загрязнителей – устойчивых в окружающей среде органических соединений. Общеизвестно, что токсичные и канцерогенные эффекты полиароматических углеводородов обусловлены образованием их метаболитов. Пирен, относящийся к полиароматическим углеводородам, содержится во всех исследуемых пробах нефти. Установлено, что одним из основных метаболитов пирена является чрезвычайно токсичный бенз(а)пирен, обладающий сильнейшей канцерогенной активностью, способствующей возникновению опухолей в живых организмах.

Целью настоящего исследования является определение в организме тест-объектов пирена и его метаболита (бенз(а)пирена), а также сопутствующих нефтяному загрязнению тяжелых металлов и радионуклидов как объективного метода для оценки канцерогенного риска.

Объекты. В качестве тест-объектов (биоиндикаторов) из природных популяций отобраны гидробионты (рыбы, моллюски и полихета (*Nereis diversicolor*) и наземные обитатели прибрежной зоны Каспия – дождевые черви (*Eisenia fetida*).

Методы: атомно-адсорбционная спектрометрия и радиологические методы исследования.

Результаты. Проведен анализ способности гидробионтов и наземных представителей аккумулировать нефтепродукты, сопутствующие тяжелые металлы и радионуклиды. Изучены основные особенности накопления загрязнителей в организме тест-объектов, представляющих разные экосистемы исследуемой зоны; определена суммарная радиоактивность образцов. Проведено сравнение содержания нефтепродуктов, радионуклидов в органах и тканях гидробионтов.

Ключевые слова:

Каспийское море, тест-объекты, биологические эффекты, радиация, загрязнители.

Введение

Сохранение экологической устойчивости Каспийского моря как уникального природного объекта приобретает на сегодня небывалую актуальность, поскольку биологические и углеводородные ресурсы данного закрытого водоема не имеют аналогов. Вопрос о международно-правовом статусе Каспия и о разделении нефтяных ресурсов между прикаспийскими странами решился в 2018 г. Тем не менее море остается общим экологически важным объектом региона. Загрязнение в одной из частей Каспия выльется в общую неразделимую экологическую проблему и в итоге может отразиться на личных перспективных планах развития каждой страны. Основным источником загрязнения моря являются нефтяные отходы. Это в первую очередь отражается на жизнедеятельности фитобентоса и фитопланктона, который обеспечивает теплогазовый обмен в морской воде. При этом распространение нефтяной пленки даже на незначительных площадях ведёт к гибели редких видов рыб и других водных организмов. Полиароматические углеводороды (ПАУ) как основной компонент нефтяного загрязнения представляют опасность в первую очередь как канцерогены, так как пирен, входящий в состав любой нефти, при поступлении в организмы в результате клеточного

метаболизма превращается в бенз(а)пирен, который является пусковым механизмом злокачественного перерождения клеток [1, 2]. В морской среде казахстанской зоны Каспия помимо углеводородов содержатся тяжелые, редкие и переходные металлы, радионуклиды как естественные (в рассеянной форме в осадочных породах), так и техногенные (привнесённые с речным стоком в виде компонентов промышленных отходов), являющиеся опасными загрязнителями. Металлы как мутагенные и канцерогенные факторы оружающей среды воздействуют на биоту и приводят к тяжелым биологическим, в том числе к отдаленным (генетическим), последствиям, несмотря на то, что как микроэлементы металлы имеют большое значение для жизнедеятельности рыб и других гидробионтов [3, 4]. По данным лабораторных исследований установлено, что наибольшие концентрации тяжелых и переходных металлов в воде Каспия приходятся на медь, алюминий, цинк и барий. Содержания меди и цинка в воде достигают 20 мкг/л (при ПДК 10 мкг/л), бария – 50 мкг/л (при ПДК 0,7 мкг/л). Экологические проблемы Каспия возникли в результате длительного экстенсивного развития экономики региона, а также актуальных социально-экономических проблем (кризисы, конфликты транснациональных корпораций и т. д.) [5–9].

Для оценки экологического состояния природной среды, подвергшейся техногенному загрязнению наряду с химическими и физическими, все чаще применяют биологические методы. При этом в качестве биотестов используются живые организмы. По ответной реакции организма, проявляющейся на молекулярном, клеточном, тканевом, организменном уровне, можно судить о потенциальной биологической опасности исследуемых факторов окружающей среды. Наиболее эффективными тест-объектами для получения достоверных результатов являются доминантные виды местной фауны, представляющие разные систематические группы и трофические уровни экосистемы. В наших исследованиях использованы широко распространенные в Каспийском море и р. Урал гидробионты и наземные обитатели. Их преимущество в том, что они широко распространены и отвечают всем требованиям биоиндикаторов среды обитания. Содержание сопутствующих с нефтью тяжелых металлов в организмах тест-объектов определяли методом атомно-абсорбционной спектrophотометрии (ААС). Впервые использована разработанная нами методика приготовления образцов полихет для хроматографического анализа. После обработки образцов червей в полученный осадок добавляется необходимое количество пирена, растворенного в минимальном объеме ацетона и морской воды. Седимент перемешивается с пиреном на автоматической мешалке непрерывно в течение 5 часов. Затем после осаждения вода удаляется, и приготовленный образец выставляется в термостат при температуре 5 °C на одну неделю до использования в эксперименте. В данном случае объекты, такие как морские черви, выдерживаются пять дней. Далее образцы с червями отстаиваются в морской воде (минимум 4 часа до экстракции) для очистки их кишечника.

Пробы кишечной ткани взвешивают и переносят в тест-тубы. Для того чтобы частицы кишечной ткани осаждались, пробы в присутствии метанола гомогенизируются, обрабатываются ультразвуком (10 мин) и центрифугируются (3000 об/мин, 5 °C, 10 мин). Затем супернатант фильтруется и переносится в сосуды ВЭЖХ (Высоко Эффективная Жидкостная Хроматография) с флуоресцентными и УФ детекторами для

определения метаболитов пирена. Суммарную радиоактивность биообъектов определяли на дозиметре МКСАТ-6130 (2010 г.). На биосубстратах измеряли радиоактивность элементов: K^{40} , Th^{232} , Ra^{226} , Cs^{137} , и их количественное содержание с использованием спектрофотометра (комплексе «Прогресс Б-Г», 2015). Измерения активности проводили в пятикратной повторности (одно проба течение 30 минут).

Химические загрязнители

Нативная нефть. Для оценки накопления нефти в организме в качестве тест-объекта использовали морских червей (*Nereis diversicolor*). Результаты проведенных лабораторных токсико-генетических исследований природных тест-объектов позволяют корректировать используемые в природоохранных документах ПДК. Полученные результаты по содержанию бенз(а)пирена показаны в табл. 1.

Таблица 1. Содержание бенз(а)пирена в организме тест-объектов из прибрежной зоны Каспия

Table 1. Benzo(a)pyrene content in test-objects body from the coastal zone of the Caspian sea

Виды тест-объектов Species of test-objects	Содержание бенз(а)пирена, мкг/кг Benz(a)pyrene content, mcg/kg (ПДК, LtdC – 0,001)
<i>Sander volgensis</i>	0,232±0,02
<i>Sander lucioperca</i>	0,049±0,003
<i>Abramis brama</i>	0,026±0,002
<i>Unio pictorum</i>	0,013±0,002
<i>Dreissena polymorpha</i>	0,375±0,03
<i>Nereis diversicolor</i>	0,381±0,04
<i>Eisenia fetida</i>	0,566±0,04

Наземный представитель кольчатых *Eisenia fetida* (дождевой червь) был взят в качестве позитивного контроля из тех же биотопов прибрежной зоны Каспия. Во всех исследуемых организмах, как морских, так и наземных, содержание бенз(а)пирена больше установленного ПДК (0,001мкг/кг) и составляет от 0,013 до 0,566 мкг/кг.

Тяжелые металлы (ТМ). Проведено также исследование накопления ТМ в организмах взятых объектов. Полученные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание ТМ в органах и тканях в тест-объектах, мг/кг

Table 2. Content of heavy metals in organs and tissues in test-objects, mg/kg

Название вида/View name	Fe	Zn	Ni	Cd	Cu	Pb
<i>Sander volgensis</i>	30,183±1,2 ПДК 30 Ltd C 30	16,895±0,58 ПДК 40 Ltd C 40	0,573±0,02 ПДК 20 Ltd C 20	0,129±0,005 ПДК 0,2 Ltd C 0,2	1,399±0,05 ПДК 10,0 Ltd C 10,0	3,606±0,14 ПДК 1,0 Ltd C 1,0
<i>Sander lucioperca</i>	122,342±5,2 ПДК 30 Ltd C 30	4,918±0,21 ПДК 40 Ltd C 40	0,435±0,015 ПДК 20 Ltd C 20	0,087±0,002 ПДК 0,2 Ltd C 0,2	0,199±0,01 ПДК 10,0 Ltd C 10,0	1,875±0,065 ПДК 1,0 Ltd C 1,0
<i>Abramis brama</i>	114,688±4,9 ПДК 30 Ltd C 30	7,355±0,30 ПДК 40 Ltd C 40	1,973±0,06 ПДК 20 Ltd C 20	0 ПДК 0,2 Ltd C 0,2	1,506±0,063 ПДК 10,0 Ltd C 10,0	4,419±0,19 ПДК 1,0 Ltd C 1,0
<i>Unio pictorum</i>	192,622±7,3 ПДК не установлено Ltd C no estimated	15,554±0,53 ПДК 200 Ltd C 200	2,856±0,1 ПДК 200 Ltd C 200	0,115±0,005 ПДК 2,0 Ltd C 2,0	2,104±0,1 ПДК 30,0 Ltd C 30,0	0,832±0,035 ПДК 10,0 Ltd C 10,0
<i>Dreissena polymorpha</i>	312,36±15,1 ПДК не установлено Ltd C not estimated	39,996±1,7 ПДК 200 Ltd C 200	6,962±0,33 ПДК 200 Ltd C 200	0,064±0,003 ПДК 2,0 Ltd C 2,0	1,578±0,065 ПДК 30,0 Ltd C 30,0	1,248±0,055 ПДК 10,0 Ltd C 10,0
<i>Nereis diversicolor</i>	135,356±5,4 ПДК не установлено Ltd C not estimated	11,11±0,43 ПДК 200 Ltd C 200	2,892±0,11 ПДК 200 Ltd C 200	0,128±0,005 ПДК 2,0 Ltd C 2,0	3,945±0,17 ПДК 30,0 Ltd C 30,0	0,416±0,016 ПДК 10,0 Ltd C 10,0

Среди рассмотренных ТМ наибольшей аккумулятивной способностью обладают железо (в среднем 151,258 мг/кг для всех тест-объектов) и цинк (16,0 мг/кг). Следует отметить, что по степени токсичности железо не представляет столь высокой опасности как для гидробионтов, так и для человека, в сравнении с кадмием, медью или свинцом. Общеизвестно, что в организме животных железо входит в состав множества ферментов, участвующих в окислительно-восстановительных реакциях, главным образом в процессе дыхания. Тем не менее повышенное содержание железа оказывает общетоксическое действие, разрушая антиоксидантную систему организма. Источником железа и других тяжелых металлов яв-

ляются пластовые воды, поступающие в Каспий в процессе добычи, транспортировки и переработки нефти. Высокое содержание железа отмечается в бентосных организмах и в организме рыб, что объясняется быстрым переходом растворенных ионных форм Fe^{2+} в Fe^{3+} , выпадающих в осадок в виде различных оксидов и гидроксидов, а также в виде органоминеральных комплексов.

Радиационное загрязнение. Превышение фонового уровня β -излучения у представителей кольчатых червей *Nereis diversicolor* и *Eisenia fetida* (табл. 3) выявлено в результате определения общего уровня суммарной радиоактивности.

Таблица 3. Суммарный уровень β -излучения тест-объектов

Table 3. Summary level of β -irradiation in test-objects

Название пробы Sample title	β -излучение, 1/мин*см ² β -radiation, 1/min*cm ²	Название пробы Sample title	β -излучение, 1/мин*см ² β -radiation, 1/min*cm ²	Название пробы Sample title	β -излучение, 1/мин*см ² β -radiation, 1/min*cm ²
Ткань жабер леща Tissue of bream gills	0,83±0,003	Ткань жабер судака Tissue of zander gills	1,05±0,006	Ткань мышц nereis Tissues of <i>Nereis diversicolor</i>	6,24±0,021
Ткань мышц леща Tissue of bream muscles	0,88±0,003	Ткань мышц судака Tissue of zander muscles	1,41±0,007	Ткань мышц дождевого червя Tissues of <i>Eisenia fetida</i>	8,81±0,021
Ткань жабер берша Tissue of bersh gills	1,42±0,007	Ткань мышц перловицы Tissue of pearl bar muscles	0,86±0,004	–	–
Ткань мышц берша Tissue of bersh muscle	1,42±0,007	Ткань мышц дрейсен Tissue of dreisena muscle	0,86±0,003	–	–

В жаберных мышцах лещей и судаков наблюдается более высокий уровень активности радионуклидов, чем в мышцах их тела, в то время как в тканях рыбы берш обнаружены одинаковые показатели радиоактивности. Полученные результаты по активности радионуклидов в органах разных видов

гидробионтов коррелируют с данными по содержанию γ -излучающих радионуклидов в объектах и свидетельствуют о различной тканевой радиочувствительности тест-объектов. По этим показателям результаты всех измерений выше или близки к ПДК, за исключением Cs^{137} (табл. 4).

Таблица 4. Активность γ -излучающих радионуклидов в тест-объектах

Table 4. Activity of γ -irradiated radionuclides in test-objects

Название пробы Sample title	Активность радионуклидов, Бк/кг/Activity of radionuclides, Bq/kg			
	Cs^{137}	Ra^{226}	Th^{232}	K^{40}
Лещ (<i>Abramis brama</i>) Bream	64,5±0,5	155±0,4	119±0,5	1296±12,3
Судак (<i>Sander lucioperca</i>) Zander	63±0,4	123±0,4	70±0,4	1124±12,4
Берш (<i>Sander volgensis</i>) Bersh	65±0,4	164±0,5	124±0,4	1300±11,9
Перловица (<i>Unio pictorum</i>) Pearl bar	109±0,5	31±0,3	43±0,4	625±9,9
Дрейсена (<i>Dreissena polymorpha</i>) Dreisen	76±0,3	32±0,5	45±0,4	624±9,8
Нереис (<i>Nereis diversicolor</i>) Nereis	111±0,5	100±0,3	100±0,3	850±9,8
Дождевые черви (<i>Eisenia fetida</i>) Earthworms	125±0,4	185±0,6	169±0,5	1332±12,5
Допустимая доза Ltd activity dose	370	32	45	700

Из данных табл. 4 видно, что активность Cs^{137} в тест-объектах существенно ниже допустимых уровней, K^{40} меньше в моллюсках, чем в остальных организмах, Ra^{226} и Th^{232} в пределах нормы в тканях перловицы и дрейсен. Из всех исследуемых видов рыб в организме судака (*Sander volgensis*) отмечается

наименьший уровень активности радионуклидов, несмотря на то, что он активный хищник. Обнаруженные низкие концентрации радиоактивности элементов в органах и тканях исследованных тест-объектов, по-видимому, связаны с особенностями метаболизма и выведения радионуклидов из организма. Таким об-

разом, полученные результаты позволяют судить о специфике видовой радиочувствительности использованных тест-объектов.

Обсуждение результатов

Преимущество методов с использованием природных популяций (*in situ*) для оценки экологического состояния экосистемы в отличие от лабораторных испытаний в том, что они ориентированы на изучение сообществ организмов в естественных условиях. Это дает возможность проводить оценку по целому комплексу биотических показателей. Как следует из наших исследований, среди беспозвоночных активность радионуклидов (по цезию) значительно выше у видов более тесно контактирующих с почво-грунтом. К ним относятся представители бентоса – морской червь (*Nereis diversicolor*) и наземный – дождевой червь *Eisenia fetida*, жизнедеятельность которых связана с накоплением радионуклидов в донных отложениях (бентосе) и в почве прибрежной зоны, откуда они попадают в тест-объекты через трофические цепи питания. Другой путь – миграция радионуклидов из горных и осадочных пород. Из данных литературы [10–13] следует, что элементы Ra^{226} , Th^{232} сопутствует загрязнению окружающей среды в зоне добывающей промышленности. Поэтому многие исследователи рекомендуют интегральный подход для оценки загрязнения природной среды. Данные наших исследований (табл. 3, 4) свидетельствуют о неблагоприятной радиационной обстановке в акватории казахстанской зоны Каспия. Реальную опасность представляют для человека поступление радионуклидов в продукты питания населения области по трофическим цепям: почва–растения–животные. Однако лабораторные методы биотестирования имеют свои недостатки, а именно, результаты эксперимента не могут быть экстраполированы на весь биоценоз для оценки его состояния. В свою очередь результаты молекулярно-генетического и цитогенетического анализа (хромосомный и микроядерный) с использованием доминантных видов из природных популяций служат основанием для рекомендации в качестве доказательного метода оценки реальной опасности влияния загрязнителей на окружающую среду и биоту [14–16]. Это позволяет проводить интегральную оценку эффекта антропогенных факторов и ранжирование отдельных районов по степени экологического неблагополучия. Исследование последствий загрязнения добывающей промышленности для природных популяций является необходимым условием для оценки отдаленных (генетических) эффектов нефтепродуктов, ионизирующих излучений и тяжелых металлов на природные сообщества. Следует отметить, что в цитогенетических исследованиях по тестированию на мутагенность химических, физических и биологических агентов используют различные тест-системы, среди которых высокую чувствительность показывает микроядерный тест. По данным литературы использование микроядерного теста у рыб из водоемов зоны исследования установлена индукция опухолей у рыб

в результате перерождения нормальных клеток в злокачественные. Сравнение полученных результатов находит свое подтверждение в работах отечественных исследователей. Так, имеются данные об использовании окуня и плотвы в качестве биоиндикаторов открытых водоемов, расположенных вблизи уранодобывающих регионов Северного Казахстана [17–26]. Гидробионты Каспийского моря (моллюски) реагируют на наличие тяжелых металлов синтезом особых белков – металлотионинов. Данная группа белков связывается с тяжелыми металлами и способствует их нейтрализации. Опираясь на эти сведения, можно полагать, что изменение уровня белков – металлотионинов в тканях *Dreissena polymorpha* – это механизм защиты организма от токсического действия Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} и Cd^{2+} [27, 28]. Дождевые черви также могут быть рекомендованы в качестве биоиндикатора для оценки эффекта радиационного загрязнения. Кроме того, поведение радионуклидов в звене «почва–дождевые черви» позволяет проследить их дальнейшую миграцию в трофических цепях зооценозов. Однако черви не всегда могут быть биоиндикатором радиоактивного загрязнения, так как их численность сильно варьирует в зависимости от типа почв.

Таким образом, определение аккумуляции загрязнителей в организме тест-объектов и их метаболитов как специфических ксенобиотиков в зоне исследования является актуальной проблемой. По данным многих исследований общепринято считать, что ПАУ и другие поллютанты обладают токсическими и канцерогенными эффектами, например, основное соединение ПАУ – пирен, служит главным критерием оценки экологического риска полиароматических углеводородов для биоты и человека [29, 30].

Выводы

1. Показано накопление метаболита пирена в организме *Nereis diversicolor* (полихета – морской червь), мышечной ткани исследованных гидробионтов (рыб, полихет и моллюсков). Причем наибольшее содержание бенз(а)пирена отмечается в тканях рыбы *S. volgensis* (берш) – в мышцах и печени, в мягких тканях вида *Dreissena polymorpha* (моллюск). Тем самым наличие бенз(а)пирена в тканях исследованных гидробионтов свидетельствует о способности его накопления в организме тест-объектов.
2. Выявлено высокое содержание сопутствующих нефти тяжелых металлов (железо, свинец) в тест-объектах и радионуклидов (радий, торий и калий-40). Сопутствующие нефти тяжелые металлы, вероятно, оказывают модифицирующее влияние на трансформацию пирена как канцерогенного фактора в органах и тканях организмов.
3. Полученные данные свидетельствуют о наличии специфической видовой и тканевой чувствительности изученных видов тест-объектов к действию нефти, сопутствующих тяжелых металлов и радионуклидов, их потенциальной канцерогенной и мутагенной опасности для биоты и человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ecological assessment of oil-gas producing area in Kazakhstan zone of Caspian sea and using bioremediation technology for cleaning of high level oil polluted sites / A.A. Bigaliev, N.E. Ishanova, A.B. Bigaliev, Z.M. Bijasheva // *International journal «Colloid and Surface»*. – 2008. – Special issue. – P. 57–63.
2. Экологические проблемы Каспия как энергетического и жизненного источника: рациональный менеджмент и сохранение устойчивости экосистем региона / А.К. Шаметов, А.Н. Кожамметова, А.Б. Бигалиев, Р.К. Бигалиева, А.А. Кулумбетов, Е.Т. Жанбуршин // Проблемы и перспективы индустриально-инновационного развития в евразийском экономическом союзе (ЕАЭС): Материалы международной научно-практической конференции. – Караганды, 2014. – С. 32–36.
3. Qaribov A.A., Suleymanov B.A., Mikayilova A.C. Determination of natural radionuclides in drinking and agricultural water // *Chemistry Problems*. – 2012. – № 3. – P. 96–99.
4. Bigaliev A.B., Bigaliev A.A. Radiation genetic and ecology problem's in Kazakhstan at the environment polluted condition // *Medical journal*. – 2007. – № 7. – P. 11–16.
5. Карыгина Н.В., Попова О.В. Средние характерные концентрации токсикантов в донных отложениях дельты волги и Северного Каспия // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. – 2017. – № 4. – С. 29–36.
6. Abbasi A., Mirekhtari F. Risk assessment of Radium-226 in drinking water samples // *International Journal of Radiation Research*. – 2019. – № 17 (1). – P. 163–169.
7. Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water / F.A. Alseroury, T. Almeelbi, A. Khan, M.A. Barakata, J.H. Al-Zahrani, W. Alali // *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*. – 2018. – № 11. – P. 373–378.
8. Activity concentrations of ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²²Rn and their health impact in the groundwater of Jordan / A.H. Alomari, M.A. Saleh, S. Hashim, A. Alsayaheen, I. Abdeldin // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2019. – № 322. – P. 305–318.
9. El-Taher A., Alshahri F., Elsamani R. Environmental impacts of heavy metals, rare earth elements and natural radionuclides in marine sediment from Ras Tanura, Saudi Arabia along the Arabian Gulf // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2018. – № 132. – P. 95–104.
10. ГОСТ РФ 58556-2019 Оценка качества воды водных объектов с экологических позиций. – М.: Стандартинформ, 2019. – 16 с.
11. Краснов Е.В., Романчук А.Ю. Новые возможности биоиндикации и мониторинга морских экосистем // *Биология моря*. – 2017. – Т. 43. – № 2. – С. 148–149.
12. Biological and genetical consequences of radiation effects / A.K. Shametov, R.K. Bigaliev, E.T. Zhamburshin, B.E. Shymshikov, A.C. Kulumbetov, Z.K. Idrisova, A.B. Bigaliev // *International Journal of Biology and Chemistry*. – 2014. – V. 7. – № 2. – P. 46–48.
13. Исследование генетических эффектов радиационно-загрязненных территорий на биоту / А. Бигалиев, Б. Бекманов, Б. Шимшиков, А. Кожамметова, Л. Адилова // *Вестник КазНУ, Серия экологическая*. – 2019. – № 3 (60). – С. 63–73.
14. Практические рекомендации по обеспечению качества и надежности цитогенетических исследований / Т.В. Кузнецова, Н.В. Шилова, М.Г. Творогова, Т.В. Харченко, И.Н. Лебедев, В.Г. Антоненко // *Медицинская генетика*. – 2019. – Т. 18. – № 5 (203). – С. 3–27.
15. Schmid W. The micronucleus test // *Mutation Research*. – 1975. – V. 31. – № 1. – P. 9–15.
16. Fenech M. The cytokinesis block micronucleus technique: A detailed description of the method and its application to genotoxicity studies in human populations // *Mutation Research*. – 1993. – № 285. – P. 35–44.
17. Радиационная обстановка рабочих мест и территории нефтегазодобывающего предприятия / М.М. Бахтин, П.К. Казымбет, Е.Т. Кашкинбаев, М.К., Шарипов А. Ибраева // *Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала: Материалы VIII Международной конференции*. – Курчатов: Национальный ядерный центр Республики Казахстан, 2018. – С. 41–42.
18. Al-Sabti K., Metcalfe C. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water // *Mutation research*. – 1995. – V. 343. – № 2. – P. 121–135.
19. Minissi S., Cicotti E., Rizzoni M. Micronucleus test in erythrocytes of *Barbus plebejus* (Teleost fishes) from two natural environment: a bioassay for the in situ detection of mutagens in freshwater // *Mutation research. Environment mutagenesis and Related Subjects*. – 1996. – V. 367. – № 3. – P. 245–251.
20. Заика К.А., Барапова М.Н., Мирошник А.А. Рыбы как биоиндикаторы для оценки качества водной среды // *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: Материалы 7-й международной научно-технической конференции*. – Омск: ОмГТУ, 2017. – С. 63–64.
21. Pempkowiak J., Szefer P. The concentration and sources of heavy metals in some sea species // *Materials of the International Conference «Ecobaltica-91»*. – Kaliningrad, 1991. – P. 121–122.
22. Molecular cytogenetics guides massively parallel sequencing of a radiation-induced chromosome translocation in human cells / M.N. Cornforth, P. Anur, N. Wang, E. Robinson, F.A. Ray, J.S. Bedford, B.D. Loucas, E.S. Williams, M. Peto, P. Spellman, R. Kolipara, R. Kittler, J.W. Gray, S.M. Bailey // *Radiation Research*. – 2018. – V. 190. – № 1. – P. 88–97.
23. Бахтин М.М., Казымбет П.П. Оценка онтогенетической изменчивости популяции хирономид открытых водоемов вблизи уранодобывающих предприятий Акмолинской области // *Медицинская радиология и радиационная безопасность*. – 2006. – № 2. – С. 45–50.
24. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments / A. Kaushik, A. Kansal, S. Kumari, C.P. Kaushik // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – V. 164. – № 1. – P. 265–270.
25. Кожамметова А.Н., Бигалиев А.Б., Шаметов А.К. Биондикационное исследование аккумуляции нефтепроизводных, тяжелых металлов в организме гидробионтов казахстанской зоны Каспия // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 2 (часть 1). – С. 58–62.
26. Данилин И.А., Павловская В.В., Залуцкая Е.А. Анализ содержания металлотионеинов у двусторчатых моллюсков разных видов, обитающих в водоемах с различной степенью антропогенной нагрузки // *Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2006. – № 1 (13). – С. 16–19.
27. Залуцкая Е.А., Павловская В.В., Данилин И.А. Содержание тяжелых металлов в ткани *Dreissena polymorpha* // *Technology Science Works in the Western Lithuania: Материалы докладов V Международной конференции*. – Литва, Клайпеда, 2006. – С. 226–227.
28. Махутова О.Н., Пряничникова Е.Г., Лебедева И.М. Сравнение спектров питания дрейссены *Dreissena polymorpha* и *Dreissena bugensis* по биохимическим маркерам // *Сибирский экологический журнал*. – 2012. – № 4. – С. 619–631.
29. Манык Ф.М., Бечин А.А. Полициклические ароматические углеводороды в химическом канцерогенезе // *Бюллетень Северного государственного медицинского университета*. – 2017. – Т. 2. – № 1 (37). – С. 109–111.
30. Шайдуллина Ж.М. Накопление углеводов в органах и тканях уральского леща // *Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина*. – 2011. – № 2 (69). – С. 64–68.

Поступила 03.09.2020 г.

Информация об авторах

Бигалиев А.Б., доктор биологических наук, профессор кафедры молекулярной биологии и генетики Казахского национального университета им. аль-Фараби.

Кожамметова А.Н., магистр биологии, старший преподаватель кафедры биофизики и биомедицины Казахского национального университета имени аль-Фараби.

UDC 575.224.23:616-001.3

OIL POLLUTION AND ASSOCIATED HEAVY METALS, RADIONUCLIDES IN THE BODY OF HYDROBIONTS OF THE KAZAKHSTAN ZONE OF THE CASPIAN SEA

Aitkhazha B. Bigaliev¹,
aitkhazha@gmail.com

Aizada N. Kozhakhmetova¹,
ayzada.1983@mail.ru

¹ Al-Farabi Kazakh National University,
71, al-Farabi avenue, Almaty, 050040, Kazakhstan.

The relevance of the research is caused by the extremely unfavorable state of ecological system of the Caspian sea and the coastal zone. In the nearest future, intensive development of oil and gas fields on the continental shelf of the Caspian sea (Kashagan) may dramatically increase the environmental burden not only on the Kazakh part of the Caspian region, but also on the entire water area of the middle and northern part of the Caspian sea. Oil as a pollutant contains polyaromatic hydrocarbons, which represent a wide class of environmentally stable organic compounds. It is generally accepted that the toxic and carcinogenic effects of polyaromatic hydrocarbons are caused by their metabolites. Pyrene is the main component of oil and the studied oil samples always contain it.

The main aim of this study is to determine polyaromatic hydrocarbons in oil and metabolite (benz(a)pyrene), as well as associated heavy metals and radionuclides in the body of test objects as a sufficiently objective method for assessing environmental risk.

Objects. The aquatic (piscines, mollusks, polyhetas) and terrestrial inhabitants (earthworm) of the coastal zone of the Caspian sea were selected from natural populations as test-objects (bio-indicators).

Methods: atomic adsorption spectrometry and radiological methods of research.

Results. The authors have analyzed the ability of hydrobionts and ground representatives capable of accumulating petroleum products, included heavy metals and radionuclides and studied the main features of accumulation of pollutants in the body of test-objects representing different ecology systems of the studied zone, determined the level of total radioactivity. The paper compares the studied species of hydrobionts, the content of petroleum products, heavy metals and radionuclides in organs and tissues.

Key words:

Caspian sea, test-objects, biological effect, radiation, pollutants.

REFERENCES

- Bigaliev A.A., Ishanova N.E., Bigaliev A.B., Bijasheva Z.M. Ecological assessment of oil-gas producing area in Kazakhstan zone of Caspian sea and using bioremediation technology for cleaning of high level oil polluted sites. *International journal «Colloid and Surface»*, 2008, Special issue, pp. 57–63.
- Shametov A.K., Kozhahmetova A.N., Bigaliev A.B., Bigaliev R.K., Kulumbetov A.A., Zhanburshin E.T. Ekologicheskie problemy Kaspiya kak energeticheskogo i zhiznennogo istochnika: ratsionalny menedzhement i sokhraneniye ustoychivosti ekosistem regiona [Ecological problems of the Caspian as an energy and life source: rational management and preservation of the sustainability of the region's ecosystems]. *Problemy i perspektivy industrialno-innovatsionnogo razvitiya v evraziyskom ekonomicheskom soyuze (EAEU). Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects of industrial and innovative development in the Eurasian Economic Union (EAEU). Materials of the international scientific and practical conference]. Karagandy, 2014. pp. 32–36.
- Qaribov A.A., Suleymanov B.A., Mikayilova A.C. Determination of natural radionuclides in drinking and agricultural water. *Chemistry Problems*, 2012, no. 3, pp. 96–99.
- Bigaliev A.B., Bigaliev A.A. Radiation genetic and ecology problem's in Kazakhstan at the environment polluted condition. *Medical journal*, 2007, no. 7, pp. 11–16.
- Karygina N.V., Popova O.V. Srednie kharakternye kontsentratsii toksikantov v donnykh otlozheniyakh delty Volgi i Severnogo Kaspiya [Average characteristic concentrations of toxicants in the bottom sediments of the Volga delta and the North Caspian]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo*, 2017, no. 4, pp. 29–36.
- Abbasi A., Mirekhtari F. Risk assessment of Radium-226 in drinking water samples. *International Journal of Radiation Research*, 2019, no. 17 (1), pp. 163–169.
- Alseroury F.A., Almeelbi T., Khan A., Barakata M.A., Al-Zahrani J.H., Alali W. Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2018, no. 11, pp. 373–378.
- Alomari A.H., Saleh M.A., Hashim S., Alsayaheen A., Abdeldin I. Activity concentrations of ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²²Rn and their health impact in the groundwater of Jordan. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2019, no. 322, pp. 305–318.
- El-Taher A., Alshahri F., Elsaman R. Environmental impacts of heavy metals, rare earth elements and natural radionuclides in marine sediment from Ras Tanura, Saudi Arabia along the Arabian Gulf. *Applied radiology and isotopes*, 2018, no. 132, pp. 95–104.
- GOST RF 58556-2019 Otsenka kachestva vody vodnykh obektov s ekologicheskikh pozitsiy [State Standard 58556-2019. Assessment of water quality of water bodies from an environmental perspective]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 16 p.
- Krasnov E.V., Romanchuk A.Yu. Novye vozmozhnosti bioindikatsii i monitoringa morskikh ekosistem [New opportunities for bioindication and monitoring of marine ecosystems]. *Biologiya moray*, 2017, vol. 43, no. 2, pp. 148–149.
- Shametov A.K., Bigaliev R.K., Zhanburshin E.T., Shymshikov B.E., Kulumbetov A.C., Idrisova Z.K., Bigaliev A.B. Biological and genetical consequences of radiation effects. *International Journal of Biology and Chemistry*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 46–48.
- Bigaliev A., Bekmanov B., Shimshikov B., Kozhahmetova A., Adilova L. Study of the genetic effects of radiation-contaminated areas on biota. *KazNU Bulletin, Environmental Series*, 2019, no. 3 (60), pp. 63–73. In Rus.
- Kuznecova T.V., Shilova N.V., Tvorogova M.G., Kharchenko T.V., Lebedev I.N., Antonenko V.G. Practical recommendations for ensuring the quality and reliability of cytogenetic studies. *Medical genetics*, 2019, vol. 18, no. 5 (203), pp. 3–27. In Rus.
- Schmid W. The micronucleus test. *Mutation Research*, 1975, vol. 31, no. 1, pp. 9–15.
- Fenech M. The cytokinesis block micronucleus technique: a detailed description of the method and its application to genotoxicity studies in human populations. *Mutation Research*, 1993, no. 285, pp. 35–44.

17. Bakhtin M.M., Kazymbet P.K., Kashkinbaev E.T., Sharipov M.K., Ibraeva A. Radiatsionnaya obstanovka rabochikh mest i territorii neftegazodobyvayushchego predpriyatiya [Radiation situation of workplaces and territory of an oil and gas producing enterprise]. *Semipalatinskiy ispytatelnyy poligon: nasledie i perspektivy razvitiya nauchno-tekhnicheskogo potentsiala. Materialy VIII Mezhdunarodnoy konferentsii* [Semipalatinsk test site: heritage and prospects for the development of scientific and technological potential. Materials of the VIII International Conference]. Kurchatov, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, 2018. pp. 41–42.
18. Al-Sabti K., Metcalfe C. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water. *Mutation research*, 1995, vol. 343, no. 2, pp. 121–135.
19. Minissi S., Cicotti E., Rizzoni M. Micronucleus test in erythrocytes of Barbus plebejus (Teleost pisces) from two natural environment: A bioassay for the in situ detection of mutagens in freshwater. *Mutation research, Environment mutagenesis and Related Subjects*, 1996, vol. 367, no. 3, pp. 245–251.
20. Zaika K.A., Vagapova M.N., Miroshnichenko A.A. Ryby kak bioindikatory dlya otsenki kachestva vodnoy sredy [Fish as bio-indicators for assessing the quality of the aquatic environment]. *Tekhnika i tekhnologiya neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva. Materialy 7 mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Technique and technology of petrochemical and oil and gas production. Materials of the 7th international scientific and technical conference]. Omsk, OmGTU Publ., 2017. pp. 63–64.
21. Pempkowiak J., Szefer P. The concentration and sources of heavy metals in some sea species. *Materials of the International Conference «Ecobaltica-91»*. Kaliningrad, 1991. pp. 121–122.
22. Cornforth M.N., Anur P., Wang N., Robinson E., Ray F.A., Bedford J.S., Loucas B.D., Williams E.S., Peto M., Spellman P., Kollipara R., Kittler R., Gray J.W., Bailey S.M. Molecular cytogenetics guides massively parallel sequencing of a radiation-induced chromosome translocation in human cells. *Radiation Research*, 2018, vol. 190, no. 1, pp. 88–97.
23. Bakhtin M.M., Kazymbet P.P. Otsenka ontogeneticheskoy izmenchivosti populyatsii khironomid otkrytykh vodoemov vblizi uranodobyvayushchikh predpriyatiy Akmolinskoy oblasti [Assessment of ontogenetic variability of the chironomid population of open water bodies near uranium mining enterprises of Akmolinsk region]. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2006, no. 2, pp. 45–50.
24. Kaushik A., Kansal A., Kumari S., Kaushik C.P. Heavy metal contamination of river Yamuna, Haryana, India: assessment by metal enrichment factor of the sediments. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 164, no. 1, pp. 265–270.
25. Kozhahmetova A.N., Bigaliev A.B., Shametov A.K. Biondication study of the accumulation of oil derivatives, heavy metals in the body of aquatic organisms in the Kazakhstan zone of the Caspian. *Basic research*, 2015, no. 2 (part 1), pp. 58–62. In Rus.
26. Danilin I.A., Pavlovskaya V.V., Zaluckaya E.A. Analysis of the content of metallothioneins in bivalve molluscs of different species living in water bodies with different degrees of anthropogenic load. *Bulletin of the Russian University Friendship of Peoples, series Ecology and life safety*, 2006, no. 1 (13), pp. 16–19. In Rus.
27. Zaluckaya E.A., Pavlovskaya V.V., Danilin I.A. Soderzhanie tyazhelykh metallov v tkani *Dreissena polymorpha* [Heavy metal content in *Dreissena polymorpha* fabric]. *Materialy dokladov V Mezhdunarodnoy konferentsii* [Proceedings of the V International Conference. Technology Science Works in the Western Lithuania]. Litva, Klaypeda Publ., 2006. pp. 226–227.
28. Makhutova O.N., Pryanichnikova E.G., Lebedeva I.M. Comparison of the nutritional spectra of *Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugensis* by biochemical markers. *Siberian Journal of Ecology*, 2012, no. 4, pp. 619–631. In Rus.
29. Manyk F.M., Bechin A.A. Politsiklicheskie aromatische uglevodorody v khimicheskoy kantserogeneze [Polycyclic aromatic hydrocarbons in chemical carcinogenesis]. *Byulleten Severnogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta*, 2017, vol. 2, no. 1 (37), pp. 109–111.
30. Shaydullina Zh.M. Nakopleniye uglevodorodov v organakh i tkanyakh uralskogo leshcha [Accumulation of hydrocarbons in the organs and tissues of the Ural bream]. *Vestnik nauki KazATU im. S. Seyfullina*, 2011, no. 2 (69), pp. 64–68.

Received: 3 September 2020.

Information about the authors

Aitkhazha B. Bigaliev, Dr. Sc., professor, al-Farabi Kazakh National University.

Aizada N. Kozhakhmetova, master of biology, al-Farabi Kazakh National University.

УДК 550. 83: 550. 814: 553: 41

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНФОРМАТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ НА ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СИБИРИ

Ерофеев Леонид Яковлевич¹

Орехов Александр Николаевич¹,
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Гирякова Юлия Леонидовна¹,
ulg@tpu.ru

Ерофеева Галина Васильевна¹,
egv@mail.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности геофизических методов при поисках месторождений золота, в том числе за счёт использования новых методик проведения геофизических работ, в частности электроразведочной томографии вызванной поляризации. Для этой модификации электроразведки в настоящее время созданы теоретическая база, аппаратура, технологии измерений, обработки и интерпретации полевых наблюдений.

Цель: оценить информативность электротомографических работ при исследовании различных типов золоторудных месторождений.

Объекты: возможности электроразведочной томографии при исследовании различных типов золоторудных объектов.

Результаты. На типичных полях месторождений золота Сибири и в их пределах – наиболее представительные в типовой градации рудоносные площади с достаточно подробно изученной геологической обстановкой и в пределах которых были выполнены геофизические съёмки масштаба 1:2000–1:5000 (магнитометрия, электропрофилирование), проведены различные горные выработки, позволяющие привязать данные электротомографии к площадным геофизическим съёмкам и геологии исследуемых профилей. Установлено, что на рудных полях всех физико-геологических типов с помощью электротомографии можно достаточно уверенно оценивать толщину и состав покровных отложений, намечать места тектонических нарушений, определять основные черты структурного строения терригенно-осадочного комплекса пород в приповерхностных горизонтах, при благоприятных физико-геологических условиях прогнозировать местоположение оруденелых участков. Можно отметить, что наиболее информативным параметром, определяемым по материалам электротомографии в варианте вызванной поляризации, на всех физико-геологических типах золоторудных полей Сибирского региона является сопротивление пород, поляризуемость же их играет существенную роль лишь при локальной сульфидизации или графитизации пород.

Ключевые слова:

Электротомография, месторождения золота, Сибирский регион, тонкие кварцево-жильные зоны, аномальные зоны.

Введение

Электроразведка на рудных полях золота Сибири применяется длительное время. Первые электроразведочные работы (методом изолиний) на золото в этом регионе были выполнены Н.И. Сафроновым в 1928 г. на Центральном месторождении в Мариинской тайге (Кузнецкий Алатау).

В настоящее время электроразведку в различных модификациях повсеместно широко используют при решении многих геологоразведочных задач практически на всех типах рудных полей золота [1]. Эффективность применения её различна. На месторождениях золота она проводится с различными масштабами наблюдения. Измерения выполняются по таким сетям, которые даже при самых детальных съёмках не позволяют получить информацию о геологическом строении верхней части разреза, необходимую при детальном геокартировании рудоносных площадей, особенно на рудных полях золота Сибири, которые находятся в ареале вечно мёрзлых пород, где другие «поверхностные» методы, в том числе и геохимические, оказываются бессильными.

В последние десятилетия разработана новая технология производства полевых электроизмерений и интерпретации получаемых материалов, позволяющая существенно расширить возможности электроразведки при изучении верхней части разреза, которая пока не нашла должного места в общем комплексе геологоразведочных работ на золоторудных месторождениях. Речь идёт об электротомографии [2–6]. Для этой модификации электроразведки в настоящее время созданы теоретическая база, аппаратура, технологии измерений, обработки и интерпретации полевых наблюдений [7–10]. Её сейчас широко используют главным образом при проведении инженерно-геологических, археологических, экологических и гидрогеологических изысканий [11–20]. В рудных районах и, в частности, при изучении золотоносных площадей в России сделаны лишь отдельные шаги. Они, как и зарубежный опыт, свидетельствуют о широких потенциальных возможностях электротомографии при изучении рудных площадей.

В настоящей работе рассматриваются результаты многолетних исследований информативности электротомографии в типичных физико-геологических

обстановках золоторудных месторождений Сибирского региона.

Многочисленные месторождения золота Сибири сосредоточены в основном в складчатом обрамлении Западно-Сибирской платформы, с геофизических позиций они делятся на четыре группы по типу пород, слагающих рудные поля: на месторождения, расположенные в углеродисто-терригенных (черносланцевых) толщах; месторождения, локализованные в интрузивных образованиях; месторождения, сформированные в приконтактовых (скарновых) зонах; месторождения, находящиеся в терригенно-осадочных флишеидных отложениях [4].

Для определения возможностей электротомографии при изучении того или иного физико-геологического типа месторождений золота были выбраны разнolandшафтные, наиболее значимые в промышленном отношении золоторудные провинции Сибири, а в их пределах – наиболее представительные в типовой градации рудоносные площади с достаточно подробно изученной геологической обстановкой и в пределах которых были выполнены геофизические съёмки масштаба 1:2000–1:5000 (магнитометрия, электропрофилирование), проведены различные горные выработки, позволяющие привязать данные электротомографии к площадным геофизическим съёмкам и геологии исследуемых профилей.

Месторождения золота в черносланцевых толщах

Месторождения этого типа, как правило, приурочены к мощным (до сотен метров) отложениям геосинклинальных комплексов, возраст которых обычно оценивается в интервале от протерозоя до нижнего палеозоя. Типоморфной особенностью этих толщ является наличие углеродистых сланцев. Они, как правило, сульфидизированы. Кроме того, в них произошла существенная дифференциация физических свойств пород, главным образом за счёт избирательной графитизации обуглероженных отложений и обогащения их сульфидами различных металлов (чаще всего пиритом). С такими участками обычно связано золотое оруденение, которое часто пространственно приурочено к изгибам складок, образованных из этих отложений.

В Сибирском регионе к рассматриваемому типу относятся крупнейшие месторождения золота России, расположенные в пределах Енисейского кряжа (Олимпиадинское, Благодатное и др.), Ленской золоторудной провинции (Сухой Лог и др.), Восточного и Западного Саяна (Зун-Холбинское, месторождения Ольховско-Чибжекской группы и др.), а также ряда других рудных провинций Сибири, Забайкалья и ближнего зарубежья.

Опытнo-методические работы по выяснению возможностей электротомографии в пределах таких месторождений выполнены в Бодайбинском золоторудном районе, территориально относящемся к Ленской провинции, с которой связан целый ряд ранее известных и недавно открытых, в том числе в процессе проведения работ, месторождений и рудопроявлений. К основным можно отнести месторождения Сухой

Лог, Высочайший, Вернинское, Красный, Чёртово Кoryто, Невское и др.

Исследования возможностей электротомографии выполнены в пределах нескольких рудных полей. Для полевых измерений использовалась десятиканальная многоэлектродная станция Syscal-ProSwitch 72 фирмы IrisInstruments. Измерения выполнялись в варианте вызванной поляризации с определением параметра поляризуемости и удельного электрического сопротивления среды.

Исследуемые рудные поля сложены в различной степени обуглероженными и сульфидизированными терригенно-осадочными отложениями рифейско-вендского возраста, которые представлены различными сланцами, алевролитами и песчаниками. Четвертичные отложения часто занимают до 60 % площади, преобладают закрытые ландшафты – залесённые и задернованные склоны с моховым слоем, часто имеющим мощность до 1 м и более, под которым развит вечномёрзлый слой гумусо-торфяных отложений, делювиально-солифлюкционных образований. Значительную площадь занимают поля курумов.

В статье приведены результаты исследований в пределах трёх участков с известным геологическим строением, с характерными для данного региона геологическими обстановками.

На участках, где приповерхностные горизонты представлены породами, практически стерильными в отношении углеродистого вещества и (или) сульфидов, основную информацию о геологическом строении даёт удельное электрическое сопротивление. На разрезах КС, полученных по результатам двумерной инверсии, уверенно выделяются четвертичные отложения с контрастной нижней границей. Отчётливо просматривается неоднородность их состава, связанная с особенностями распределения в пространстве участков с вечномёрзлыми породами и курумом, границы между литологическими разностями пород и местоположение тектонических нарушений (по смещению границ) (рис. 1). Подчёркнём, что при обычных детальных (масштаба 1:2000) геофизических съёмках отмеченные элементы и черты геологического строения не находят заметного отражения в наблюдаемых полях.

В качестве примера на рис. 2, а приведены результаты электротомографических измерений по одному из опытных профилей. Томографический профиль пересекает ранее выявленную рудную зону. В геологическом отношении она представлена интенсивно обуглероженными сланцами, филлитами, а также песчаниками. Разрез перекрыт достаточно мощным курумом, который, как видно на рис. 2, а, весьма четко выделяется в разрезе первым слоем высоких сопротивлений, ниже его, не менее контрастно проявляется слой вечной мерзлоты, глубже разрез по данным электротомографии не дифференцируется. Последнее обусловлено высокой электропроводимостью нижней части разреза, в которой не проявляются не только литологические разности пород, но и оруденелые участки. Контур одного из них показан (в виде эллипса) на рис. 2, б. В таких условиях практически сво-

дится к нулю и возможность исследовать разрез по поляризуемости. Широкое развитие интенсивно обуглероженных и сульфидизированных пород при-

водит к тому, что измеряемые сигналы крайне малы, что делает невозможным уверенную инверсию полученных данных.

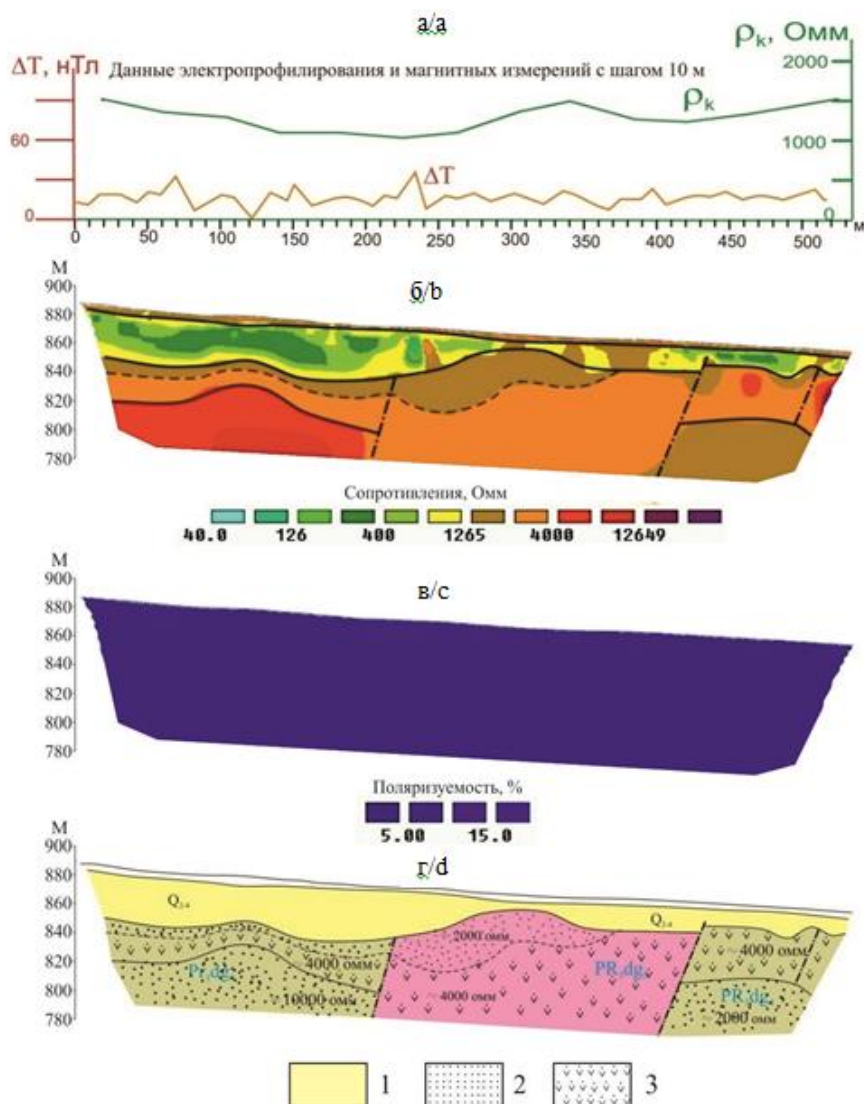


Рис. 1. Результаты геофизических работ на профиле № 1 (Бодайбинский золоторудный район): а) графики электропрофилирования (ρ_k) симметричной установкой и индукции магнитного поля (ΔT). Шаг наблюдений – 10 м; б, в) разрезы кажущегося сопротивления (ρ_k) и поляризуемости (η_k) соответственно по данным электро-разведочной томографии; г) схематический геологический разрез по результатам интерпретации. По параметру поляризуемости разрез не дифференцируется. 1 – четвертичные отложения; 2 – мелкозернистые песчаники; 3 – полимиктовые песчаники

Fig. 1. Results of geophysical surveys, profile no. 1 (Bodaibo gold ore area): a) graphs of symmetrical electrical profiling (ρ_k) and magnetic induction (ΔT). Measurement interval – 10 m; b, c) sections of apparent resistivity (ρ_k) and polarizability (η_k), respectively, according to electrical tomography data; d) schematic geological section plotted according to interpretation results. The section is not differentiated by polarizability. 1 – Quaternary formations; 2 – fine-grained sandstones; 3 – polymictic sandstones

На участках, где степень обуглероженности у разных пород различна, возможности электротомографии в изучении коренных пород в близповерхностных горизонтах существенно возрастают. С ее помощью уверенно картируется структурное строение отложений и проявления в них тектонических воздействий. Но только по величине кажущихся сопротивлений и по параметру поляризуемости пород разрез и в этих условиях практически не расчлняется. Для примера на

рис. 2, а приведены результаты электротомографических работ на участке Кяхтинский по профилю, пересекающему ось складки, в ядре которой сформирована пиритизированная золотоносная зона. По приведенному разрезу можно видеть, наряду с прочим, форму замка складки, оценить её размеры и глубину залегания, а также наметить местоположение тектонических нарушений в осадочном комплексе пород по смещению границ слоёв, выделяемых в разрезе кажущихся

сопротивлений. Собственно рудное тело в складке по сопротивлению не отмечается, а по параметру поляризуемости разрез вообще не расчленяется.

Месторождения в интрузивных породах

Месторождения золота этого физико-геологического типа представлены чаще всего кварцево-жильными телами с различным содержанием сульфидов. В Сибири рудные поля этого типа распространены наиболее широко и известны практически во всех складчатых регионах Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока.

По содержаниям сульфидов в руде среди месторождений этого типа выделяют: существенно сульфидные, умеренно сульфидные и малосульфидные. Большая часть месторождений золота Сибири относится к малосульфидным и умеренно сульфидным типам. Их рудные тела представлены, как правило, тонкими кварцево-жильными зонами [1].

Исследование возможностей электротомографии для этого типа месторождений выполнены в Мрасском зо-

лоторудно-россыпном районе Кузнецкого Алатау. Измерения проведены в варианте ВП на Беловской площади по буровому профилю (скв. 1–4), вдоль которого пройдена протяженная траншея (около 400 м) (рис. 3).

Эти горные выработки вскрыли дайки диабазового состава, золото-кварцевые жилы и прожилки, зоны березитизации и незалеченные тектонические нарушения. При сопоставлении геологического разреза с разрезом кажущегося сопротивления однозначно можно установить соответствие только самых верхних частей разрезов. Очевидно, что на полученном по результатам двумерной инверсии разрезе более или менее уверенно можно геометризовать только структурную кору выветривания, а также область других гипергенных изменений. Отдельно необходимо отметить отсутствие контрастной границы между перекрывающими отложениями и структурной корой выветривания. Выделяется только градиентный переход между этими зонами.

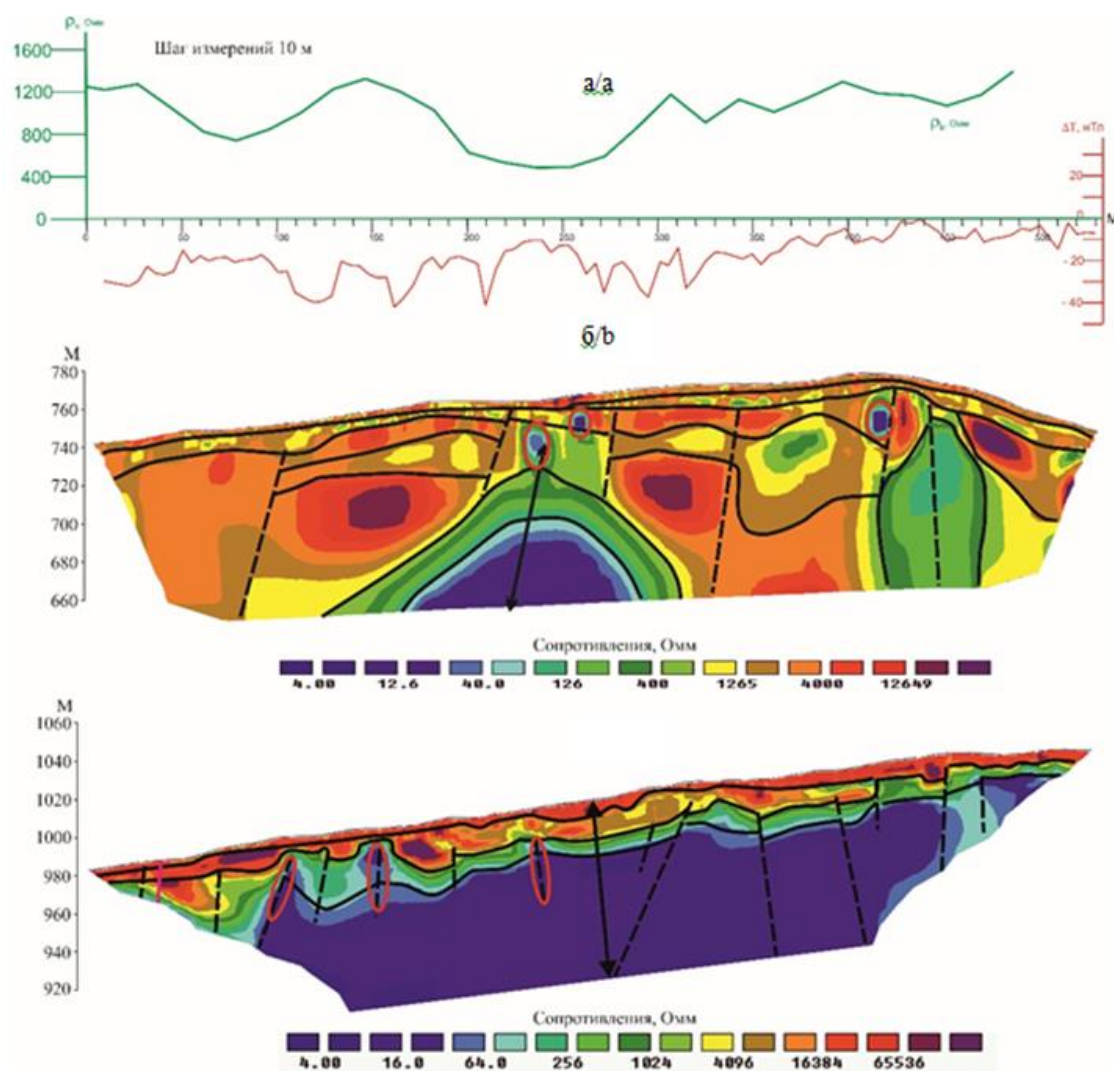


Рис. 2. Разрезы электросопротивления на участке с избирательной (а) и сплошной интенсивной графитизацией (б) в пределах Бодайбинского района Ленской золоторудной провинции. По величине поляризуемости пород разрезы не дифференцируются

Fig. 2. Electrical resistivity sections obtained in selective (a) and continuous intensive graphitization (b) area within the Bodaibo gold ore area of the Lena gold-ore province. These actions are not differentiated by rock polarizability

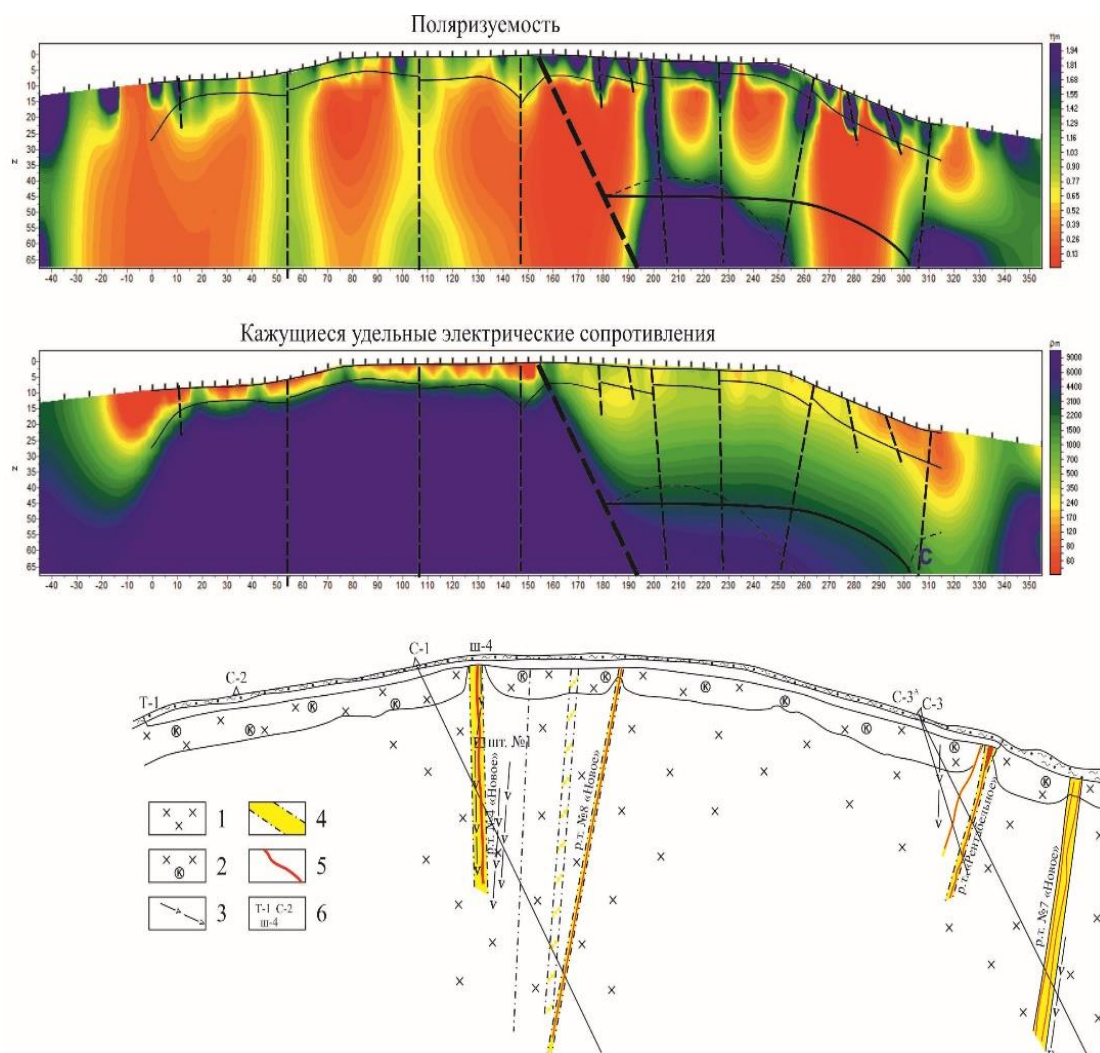


Рис. 3. Разрезы электросопротивления и поляризуемости по данным электроразведочной томографии в пределах золоторудного поля, локализованного в интрузивном массиве (Горная Шория) и геологический разрез по данным бурения и горных работ: 1 – диориты, кварцевые диориты, 2 – структурная кора выветривания по диоритам, 3 – дайки диабазов и диабазовых порфиритов, 4 – березиты, 5 – кварцевые жилы и прожилки, 6 – горные выработки

Fig. 3. Electric resistivity and polarizability sections plotted according to the data of electrical tomography in gold-ore field hosted in the intrusive rock sequence (Gornay Shoria) and a geological section according to the data from drilling and mining operations: 1 – diorites, quartz diorites, 2 – diorite weathered layer, 3 – diabase and diabaseporphyrite dikes, 4 – beresites, 5 – quartz veins and veinlets, 6 – mining operations

Какие-либо другие элементы геологического строения (в том числе жилы, нарушения и т. д.) на разрезе не выделяются. Возможная причина этого может состоять в том, что золото-кварцевые жилы, как и дайковые тела, зоны березитизации пород и вмещающие гранодиориты разрушены, превратились вместе в относительно однородную (с точки зрения электропроводности) среду, чему в немалой степени способствует обводненность этой части разреза.

По параметру поляризуемости разрез и в этом случае практически не дифференцируется. Величина кажущейся поляризуемости пород изменяется здесь без каких-либо видимых закономерностей в незначительных пределах – 0,2–1,5 %. Исключение составляют субвертикальные линейные зоны, которые достаточно хорошо совпадают с известными тектоническими нарушениями и жилами.

Месторождения золота контактовых зон

Месторождения золота этого типа приурочены к контакту между терригенными породами и интрузивными образованиями и, как правило, представлены скарнами и скарноидами.

Чаще всего к сибирским месторождениям этого типа относят Синюхинское, Мурзинское, Фёдоровское, Чайское, Натальинское, Тардан, Майско-Лебединское, Ульменское, Югалинское, Южное и другие месторождения и рудопоявления.

В Забайкалье скарновыми считаются Юбилейное, Андрюшинское, Быстринское, Желанное, Урюмканское и другие месторождения и рудопоявления.

Для скарновых месторождений, как правило, характерна полигенная минерализация. Наиболее ранняя минерализация является высокотемпературной.

Она непосредственно связана со скарнами (в том числе и генетически).

Более поздняя минерализация в основном является средне- и низкотемпературной. Для неё характерно отсутствие явно выраженной связи со скарнами. Как правило, она представляет собой золото-кварц-сульфидное оруденение, часто локализованное в тонких трещинах. Возможности электротомографии при разведке жильного оруденения скарновых месторождений рассмотрены в предыдущем разделе настоящей статьи, ниже речь пойдёт о высокотемпературной минерализации.

Рудные тела высокотемпературной минерализации являют собой объёмы скарнированных пород, в которых сформирована вкрапленная руда, состоящая из сульфидов, являющихся, как известно, в большинстве своём, хорошими проводниками электрического тока. Однако это обстоятельство не приводит к низкоомно-

сти рудных тел из-за того, что вкрапленники золото-содержащих сульфидов изолированы друг от друга вмещающей высокоомной средой. Поэтому рудные тела высокотемпературной генерации практически не проявляются в поле электросопротивления на фоне скарнированных пород, которые представляются сравнительно однородными высокоомными образованиями, уверенно выделяемыми в разрезе по данным электротомографии (рис. 4, б). В противоположность этому по параметру поляризуемости участки скарнированных пород не отличаются от других массивов пород, слагающих рудоносную площадь, но рудные тела по параметру поляризуемости находят своё отражение в виде локальных аномалий повышенной поляризуемости (рис. 4, в). Это является ярким примером классического сочетания методов сопротивления и вызванной поляризации.

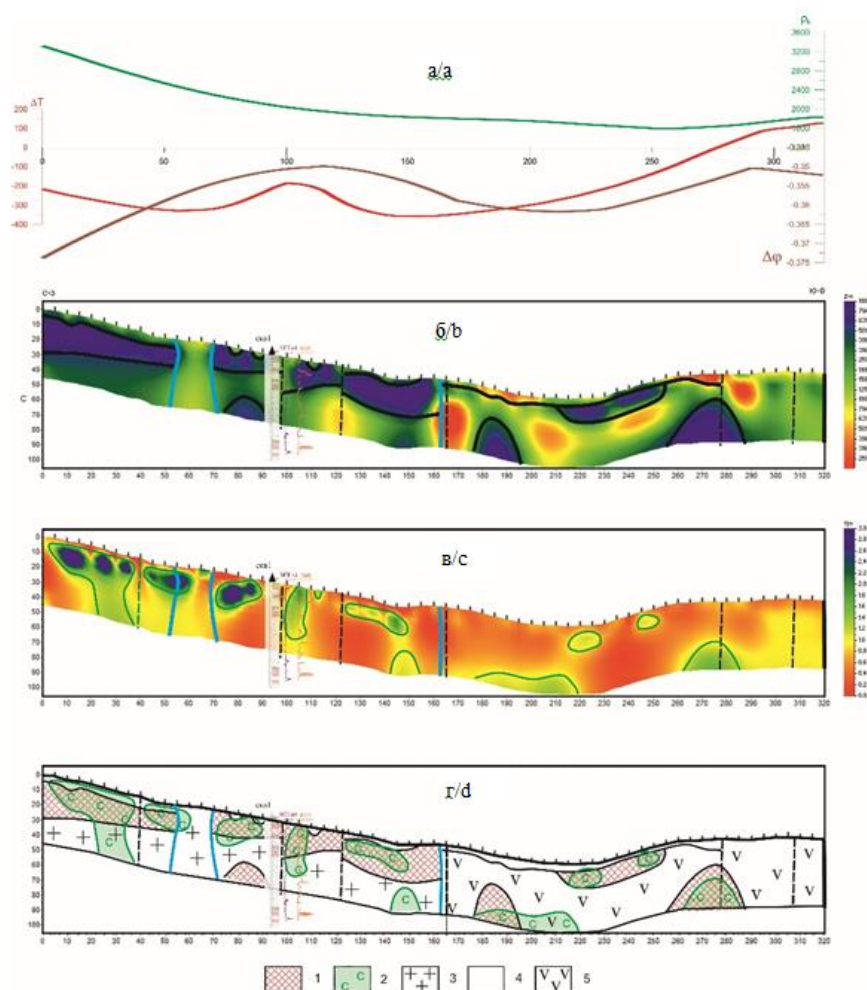


Рис. 4. Результаты геофизических измерений и сопоставление их с геологическими данными на Ийской площади в Западных Саянах. Условные обозначения: а) графики кажущегося электрического сопротивления, приращения индукции магнитного поля и угла сдвига фазы; б) разрез по величине электрического сопротивления пород; в) разрез по величине поляризуемости; г) схематический геологический разрез, в котором: 1 – рудные тела в зоне скарнирования пород; 2 – рассеянная сульфидизация; 3 – гранодиориты; 4 – делювиальные отложения; 5 – вулканогенные осадочные породы

Fig. 4. Results of geophysical measurements and their correlation with geological data obtained in the Iyskoe area in the Western Sayan Legend: a) graphs of apparent electrical resistivity, increment of magnetic induction and phase angle; b) sectional view of electrical resistivity of rock; c) sectional view of polarizability; d) schematic geological section, in which: 1 – ore bodies in skarnization zone; 2 – disseminated sulphide mineralization; 3 – granodiorites; 4 – talus deposits; 5 – volcanogenic sedimentary rocks

Золоторудные месторождения терригенно-осадочных флишеидных толщ

Как и скарновые месторождения, объекты этого типа в большинстве своём известны в Сибири (Советское, Эльдorado и др.) и Забайкалье (Тасеевское, Любавинское и др.).

Месторождения золота в флишеидных толщах представлены чаще всего минерализованными зонами и гнездами обычно относятся к кварц-золото-сульфидной формации [1].

Характерной особенностью таких месторождений, с точки зрения электропроводности слагающих пород, является то, что углистое вещество не играет здесь существенной роли в электропроводности геологической среды. Аномальные эффекты на рудных полях обуславливаются главным образом содержанием сульфидов (понижающих сопротивление) и интенсивностью окварцевания пород (повышающих электросопротивление). Как правило, такие аномальные участки соседствуют, совмещаются друг с другом, являются важным поисковым признаком для электроразведки.

На рис.5 показаны результаты электротомографии в варианте вызванной поляризации, полученные в Салаирском кряже на Ельской рудоносной площади. В разрезах по сопротивлению и поляризуемости пород в северо-восточной части профиля исследований четко проявляется аномальная зона, соответствующая рудному телу. По поляризуемости она однородна, по сопротивлению распадается на две части: на участок аномально повышенного и сопряженного с ним пониженного сопротивления. В поле поляризуемости эта зона однородна потому, что прокварцованный участок пород, который четко выделяется повышенным сопротивлением, содержит рассеянную минерализацию – пиритизирован. В центральной части профиля аномалия поляризуемости обусловлена повышенной обводненностью в значительной мере разрушенных пород, что подтверждается геологическими данными. На рис. 5 закартировано тектоническое канализирующее верховодку нарушение, которое, кстати, фиксируется и в поле сопротивлений по «проседанию» в этом месте коры выветривания.

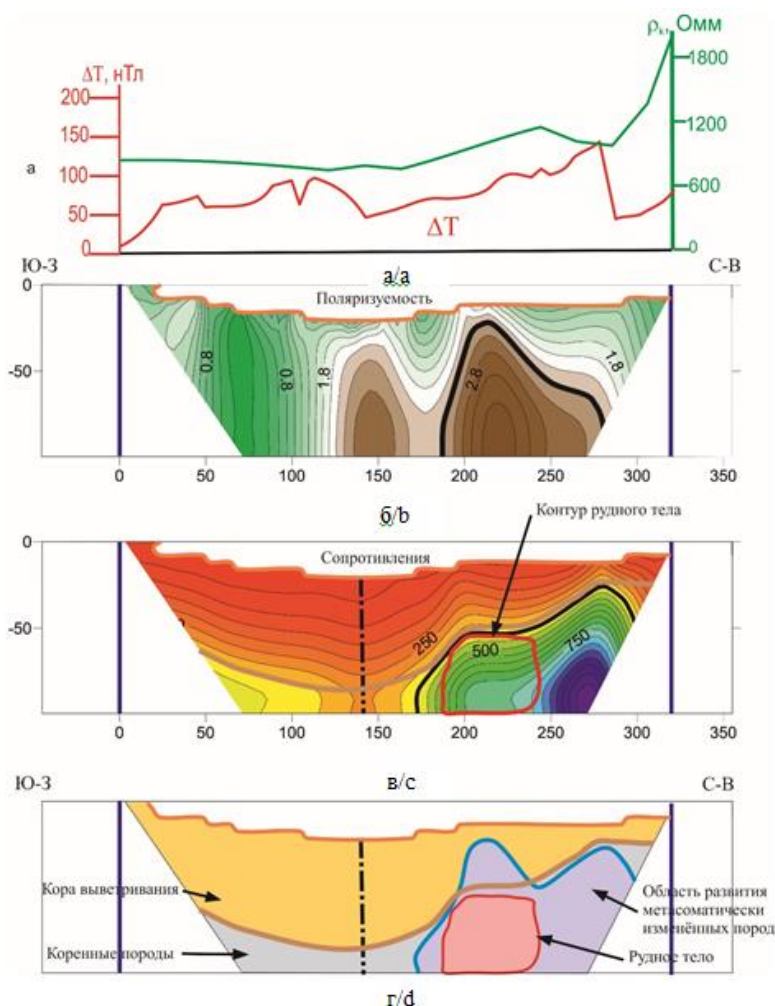


Рис. 5. Графики кажущегося сопротивления и приращения полного вектора индукции магнитного поля (а), разрезы угла сдвига фазы (б) и кажущегося электрического сопротивления (в) по данным электроразведочной томографии и интерпретационный геологический разрез (г) на Ельской золоторудной площади (Салаирский кряж)

Fig. 5. Results of geophysical measurements, conducted in the Yelskaya gold-bearing area of the Salairsky Ridge: a) graphs of apparent resistivity and increment of total vector of magnetic induction; b) polarizability and c) apparent electrical resistivity sections plotted according to electrical tomography data; d) interpretation geological section

Заключение

Электротомография позволяет решать в разной мере (в зависимости от физико-геологических условий) ряд практически важных задач при изучении геологического строения верхней части разреза золоторудных месторождений. При этом мы получаем возможность выделения таких элементов строения разреза, которые не могут быть получены при площадных электроразведочных работах, выполняемых методом электропрофилирования.

Наиболее информативным параметром, определяемым по материалам электротомографии в варианте вызванной поляризации, на всех физико-

геологических типах золоторудных полей Сибирского региона является сопротивление пород, поляризуемость же их играет существенную роль лишь при локальной сульфидизации или графитизации среды.

Таким образом, говоря об оценке роли, места и возможностей электроразведочной томографии методом вызванной поляризации при изучении разнотипных золоторудных месторождений, нужно констатировать, что эти работы должны выполняться в пределах детальных перспективных участков, выявленных по результатам площадных работ, а их основное назначение – детальная характеристика разреза (в том числе оруденения) на этапе подготовки под бурение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методическое руководство по оценке прогнозных ресурсов алмазов, благородных и цветных металлов. Выпуск «Золото» / под ред. Б.И. Беневоляский, С.С. Вартамян. – М.: Изд-во Центрального научно-исследовательского геологоразведочного института цветных и благородных металлов, 2010. – 182 с.
2. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / А.А. Бобачев, И.Н. Модин, Е.В. Перваго, В.А. Шевнин // Разведочная геофизика. – 1990. – Т. 2. – С. 17–21.
3. Опыт применения электротомографии в геофизике / Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.А. Манштейн, А.К. Манштейн, В.А. Белобородов // Геофизика. – 2012. – № 6. – С. 54–63.
4. Ерофеев Л.Я., Орехов А.Н. Геолого-геофизические условия на золоторудных полях Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 80–85.
5. Szala S., Szarka L. On the classification of surface geoelectric arrays // Geophysical Prospecting. – 2008. – № 56. – P. 159–175.
6. Griffiths D.H. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology // Journal of Applied Geophysics. – 1993. – № 29. – P. 211–226.
7. Dahlin T., Zhou B.A. Numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays // Geophysical Prospecting. – 2004. – № 52. – P. 379–388.
8. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques // Geophysical Prospecting. – 1996. – V. 44. – № 3. – P. 499–524.
9. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – V. 44. – № 4. – P. 131–152.
10. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques // Computers and Geosciences. – 2001. – V. 27. – № 9. – P. 1019–1029.
11. Dahlin T., Byeim H., Svensson C. Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Highlands Horst, Smolen, Guarantee // Journal of Engineering Geology. – 1999. – V. 32. – № 2. – P. 163–173.
12. Pellerin H. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations // Surveys in Geophysics. – 2003. – № 23. – P. 106–133.
13. Barker R., Moore J. The application of time lapse electrical tomography in groundwater studies // The Leading Edge. – 1988. – № 10. – P. 1454–1456.
14. Candansayar M.E., Basokur A.T. Detection small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archeological survey // Geophysical Prospecting. – 2001. – № 49. – P. 40–58.
15. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications // First Break. – 1996. – № 14. – P. 275–283.
16. Электромагнитное профилирование компактной аппаратурой: новый подход и результаты применения / Ю.Г. Карин, Е.В. Балков, Д.И. Фадеев, А.К. Манштейн, Г.Л. Панин, А.О. Алымов, Д.Б. Романов // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2018. – Т. 16. – № 4. – С. 68–78.
17. Tarasov V.A., Likhmanov V.L. Deep resistivity and Ip tomography for ore exploration // European Association of Geoscientists & Engineers Conference Proceedings. – Engineering and Mining Geophysics. – 2018. – V. 2018. – P. 1–6.
18. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time / R. Anand, M. Lintern, R. Hough, R. Noble, M. Verrall, W. Salama, J. Balkau, N. Radford // Geology. – 2017. – V. 45. – № 2. – P. 127–130.
19. Калибровка и экспресс-трансформация сигналов компактной аппаратуры малоглубинного электромагнитного профилирования / Д.И. Фадеев, Е.В. Балков, Г.Л. Панин, Ю.Г. Карин // Геофизика. – 2018. – № 2. – С. 52–57.
20. Орехов А.Н., Аминов М.М. Возможности геофизических методов для прогнозирования трещиноватости коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 6. – С. 198–209.

Поступила: 27.03.2019 г.

Информация об авторах

Ерофеев Л.Я., доктор геолого-минералогических наук, профессор Отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Орехов А.Н., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Гилякова Ю.Л., кандидат педагогических наук, ассистент Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ерофеева Г.В., доктор педагогических наук, профессор Отделения экспериментальной физики Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 550.83: 550. 814: 553: 41

GEOLOGICAL-GEOPHYSICAL ENVIRONMENTS AND EFFICIENCY OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY IN SIBERIAN GOLD ORE DEPOSITS

Leonid Ya. Erofeev¹

Alexander N. Orekhov¹,
orekhovan@mail.tomsknet.ru

Yuliya L. Giryakova¹,
ulg@tpu.ru

Galina V. Erofeeva¹,
egv@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to improve the efficiency of geophysical methods in the search for gold ore fields, including the use of new methods of geophysical work, electrical tomography VP particularly. Theoretical base, instrumentation, measurement, processing and field interpretation technologies have currently been developed for this method of geoelectric prospecting

The main aim of the research is to estimate the informativeness of induced polarization tomography in typical physical-geological environments of Siberian gold ore fields.

Objects of the research are opportunities of the electrical tomography during the exploration of different types of gold ore fields.

Method of the research is the electrical tomography.

Results. It has been found that in ore fields of all physical-geological types, electrical tomography can be used with sufficient assurance to evaluate the thickness and composition of overburden rocks, to locate tectonic faults, to determine the main features of the structural framework of terrigenous-sedimentary rocks in the subsurface horizons, and to make location prognosis for ore mineralization in favourable physical-geological environments. The most informative parameter determined by the data of induced polarization tomography in all types of physical-geological gold ore fields of the Siberian region is rock resistivity, whereas their polarizability is significant, provided that local sulphidization or graphitization of rocks is present.

Key words:

Electrical tomography, gold ore deposits, Siberian territory, thin quartz-vein zones, anomalous zones.

REFERENCES

1. *Methodicheskoe rukovodstvo po otsenke prognozykh resursov almazov, blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Zoloto* [Methodological guidelines for assessment of forecast resources of diamonds, precious and non-ferrous metals. Gold]. Eds. B.I. Benevolskiy, S.S. Vartanyan. Moscow, Central Research Geological Exploration Institute of non-ferrous and noble metals Publ. house, 2010. 182 p.
2. Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V., Shevnev V.A. Mnogoelektroodnye elektricheskie zondirovaniya v usloviakh gorizontarno-neodnorodnykh sred [Multielectrode electric sounding in the conditions of horizontally inhomogeneous media]. *Razvedochnaya geofizika*, 1990, vol. 2, pp. 17–21.
3. Balkov E.V., Panin G.L., Manshtein Yu.A., Manshtein A.K., Beloborodov V.A. Opyt primeneniya elektrotomografii v geofizike [Electrotomography in the geophysics]. *Geofizika*, 2012, vol. 6, pp. 54–63.
4. Erofeev L.Ya., Orekhov A.N. Geological and geophysical conditions at Siberian golden ore fields. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 1, pp. 80–85. In Rus.
5. Szala S., Szarka L. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting*, 2008, no. 56, pp. 159–175.
6. Griffiths D.H. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 1993, no. 29, pp. 211–226.
7. Dahlin T., Zhou B.A. Numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten Electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, 2004, no. 52, pp. 379–388.
8. Loke M.H., Barker R.D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion techniques. *Geophysical Prospecting*, 1996, vol. 44, no. 3, pp. 499–524.
9. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 1996, vol. 44, no. 4, pp. 131–152.
10. Dahlin T. The development of electrical imaging techniques. *Computers and Geosciences*, 2001, vol. 27, no. 9, pp. 1019–1029.
11. Dahlin T., Byeim H., Svensson C. Use of electrical imaging in site investigations for a railway tunnel through the Highlands Horst, Smolen, Guarantee. *Journal of Engineering Geology*, 1999, vol. 32, no. 2, pp. 163–173.
12. Pellerin H. Applications of electrical and electromagnetic methods for environmental and geotechnical investigations. *Surveys in Geophysics*, 2003, no. 23, pp. 106–133.
13. Barker R., Moore J. The application of time lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge*, 1988, no. 10, pp. 1454–1456.
14. Candansayar M.E., Basokur A.T. Detection small-scale targets by the 2D inversion of two-sided three-electrode data: application to an archeological survey. *Geophysical Prospecting*, 2001, no. 49, pp. 40–58.
15. Dahlin T. 2D resistivity surveying for environmental and engineering applications. *First Break*, 1996, no. 14, pp. 275–283.
16. Karin Yu.G., Balkov E.V., Fadeev D.I., Manshtein A.K., Panin G.L., Alymov A.O., Romanov D.B. Electromagnetic profiling by compact equipment: a new approach and application results. *Bulletin of Novosibirsk State University. Information technology*, 2018, vol. 16, no. 4, pp. 68–78. In Rus.
17. Tarasov V.A., Lukhmanov V.L. Deep resistivity and Ip tomography for ore exploration. *European Association of Geoscientists & Engineers Conference Proceedings- Engineering and Mining Geophysics*, 2018, vol. 2018, pp. 1–6.
18. Anand R., Lintern M., Hough R., Noble R., Verrall M., Salama W., Balkau J., Radford N. The dynamics of gold in regolith change with differing environmental conditions over time. *Geology*, 2017, vol. 45, no. 2, pp. 127–130.
19. Fadeev D.I., Balkov E.V., Panin G.L., Karin Yu.G. Calibration and rapid transformation of signals of compact equipment of low-depth

- electromagnetic profiling. *Geofizika*, 2018, no. 6, pp. 52–57. In Rus.
20. Orekhov A.N., Amani M.M. Possibilities of geophysical methods for predicting reservoir fracture. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 6, pp. 75–84. In Rus.
- Received: 27 March 2019.*

Information about the authors

Leonid Ya. Erofeev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander N. Orekhov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Yuliya L. Giryakova, Cand. Sc., senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Galina V. Erofeeva, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 622.276

УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЗАКОНА ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДЕБИТА ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ

Сохошко Сергей Константинович,
sohoshkosk@tyuiu.ru

Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность. В настоящее время для расчета дебита вертикальной газовой скважины применяется трехчленная формула, которая не учитывает тот факт, что вокруг вертикальной газовой скважины при промышленных дебитах существуют одновременно две зоны, в каждой из которых свой закон фильтрации. Размеры этих зон зависят как от фильтрационных параметров пласта, так и от рабочей депрессии на пласт.

Цель: определение зависимости дебита вертикальной газовой скважины от депрессии на пласт и фильтрационных параметров пласта с учетом размеров зон линейной и нелинейной фильтрации

Объекты: газовый пласт и несовершенная газовая скважина, линейный и нелинейный законы фильтрации газа.

Методы: аналитические методы подземной гидрогазодинамики.

Результаты. Для расчета дебита вертикальной газовой скважины в настоящее время используется известная трехчленная формула. Из данной формулы следует, что фильтрация газа происходит по нелинейному закону во всей области фильтрации от скважины до контура питания. В реальности же нелинейный закон фильтрации присутствует лишь в ограниченной зоне вокруг скважины. Не учет этого явления может приводить к увеличенной погрешности в расчетах фильтрационных коэффициентов, дебитов скважин и их продуктивности. Размер этой зоны зависит от дебита скважины, фильтрационных параметров пласта, свойств газа и т. д. С использованием аналитических методов подземной гидрогазодинамики получены формулы и алгоритм расчетов дебита газовой скважины, а также фильтрационных коэффициентов, учитывающих размер зоны нелинейной фильтрации. Радиус зоны нелинейной фильтрации находится из полученного уравнения с учетом значения критической скорости фильтрации, определяемой фильтрационными параметрами пласта. Получены выражения для фильтрационных коэффициентов трехчленной формулы притока газа к скважине. Произведен расчет дебитов газовой скважины по полученной формуле для различных значений рабочей депрессии на пласт. Различия в результатах расчетов дебитов скважины, вычисленных по традиционной и полученной формуле, уменьшаются с ростом депрессии по причине увеличения размеров зоны нелинейной фильтрации. Построены индикаторные диаграммы по полученной и традиционной формулам. По сравнению с традиционной трехчленной формулой изменяются выражения для фильтрационных коэффициентов A и B , которые теперь также зависят от размеров зоны нелинейной фильтрации.

Ключевые слова:

Вертикальная газовая скважина, дебит, трехчленная формула, фильтрационные коэффициенты, линейный и нелинейный законы фильтрации, критическая скорость фильтрации.

Введение

В настоящее время для расчета дебита вертикальной газовой скважины используют трехчленную формулу, полученную профессором Е.М. Минским [1]:

$$P_k^2 - P_c^2 = AQ + BQ^2, \quad (1)$$

где P_k – давление на контуре питания, Па; P_c – забойное давление, Па; Q – дебит скважины в стандартных условиях, м³/с; A, B – фильтрационные коэффициенты.

Из этой формулы следует, что закон фильтрации газа нелинейный. Однако закон фильтрации нелинейным может быть только в непосредственной близости от забоя скважины, где скорость фильтрации газа превышает критическую. На это указывал в своей статье профессор З.С. Алиев [2].

В работе профессора З.С. Алиева отмечено также, что поскольку в газовой залежи, разрабатываемой на истощение, происходит постоянное падение пластового давления, стационарного режима как такового быть не должно. Им получены формулы для расчета дебита газовой скважины с учетом постоянного падения пластового давления.

Здесь мы рассмотрим случай, когда падением пластового давления можно пренебречь и необходимо рассчитать дебит газовой скважины при заданном пластовом давлении с учетом изменения закона фильтрации.

Объект и методы исследования

Известно, что закон фильтрации газа в призабойной зоне вертикальной скважины нелинейный [1, 2 и др.]. В то же время в удаленной от забоя скважины зоне скорости фильтрации невелики и в результате закон фильтрации здесь линейный [3–6 и др.]. Рассмотрим схему притока газа к скважине (рис. 1).

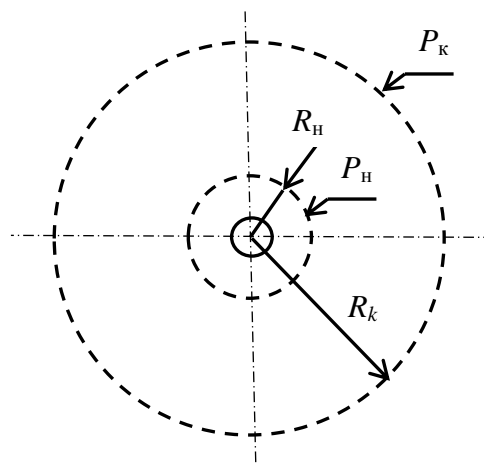


Рис. 1. Двухзонная схема притока газа к скважине
Fig. 1. Dual-zone diagram of gas influx into the well

Запишем уравнения для дебита скважин с радиусами r_c и R_n :

$$\begin{cases} P_k^2 - P_n^2 = \frac{QzP_{ат}T_{пл}}{2\pi khT_{ст}} \ln\left(\frac{R_k}{R_n}\right); \\ P_n^2 - P_c^2 = AQ + BQ^2, \end{cases} \quad (2)$$

здесь P_n – давление на границе зоны нелинейной фильтрации, Па; μ – вязкость газа в пластовых условиях, Па·с; z – коэффициент сверхсжимаемости в пластовых условиях, б/р; $P_{ат}$ – атмосферное давление, Па; $T_{пл}$ – пластовая температура, °K; k – проницаемость пласта, м²; h – толщина пласта, м; $T_{ст}$ – стандартная температура, °K; R_k – радиус контура питания, м; R_n – радиус зоны нелинейной фильтрации, м.

Складывая уравнения (2) и избавляясь от неизвестного давления P_n , получаем уравнение для притока к газовой скважине с линейным законом фильтрации в удаленной зоне пласта и нелинейным законом в призабойной зоне:

$$P_k^2 - P_c^2 = \left[\frac{zP_{ст}T_{пл}}{2\pi khT_{ст}} \ln\left(\frac{R_k}{R_n}\right) + A \right] Q + BQ^2, \quad (3)$$

$$\text{здесь} \quad A = \frac{zP_{ст}T_{пл}}{\pi khT_{ст}} \left[\ln\left(\frac{R_n}{r_c}\right) + C_1 + C_2 \right],$$

$$B = \frac{\rho_{ст}zP_{ст}T_{пл}}{2\pi^2lh^2T_{ст}} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_n} + C_3 + C_4 \right),$$

C_1, C_3 и C_2, C_4 – фильтрационные сопротивления соответственно по характеру и степени вскрытия пласта [3, 7–9].

После упрощения получаем уравнение притока газа к несовершенной газовой скважине с учетом радиуса зоны нелинейной фильтрации:

$$\begin{aligned} P_k^2 - P_c^2 = & \frac{zP_{ст}T_{пл}}{\pi khT_{ст}} \left[\ln\left(\frac{\sqrt{R_k R_n}}{r_c}\right) + C_1 + C_2 \right] Q + \\ & + \frac{\rho_{ст}zP_{ст}T_{пл}}{2\pi^2lh^2T_{ст}} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_n} + C_3 + C_4 \right) Q^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Как видно, при $R_n = R_k$ уравнение (4) превращается в уравнение профессора Е.М. Минского.

Неизвестными в этом уравнении являются дебит скважины Q и радиус зоны, в которой наблюдается нелинейный закон фильтрации R_n . Радиус этой зоны можно определить, зная критическую скорость фильтрации газа $v_{кр}$ на цилиндрической поверхности радиуса R_n .

Скорость фильтрации v_ϕ на расстоянии R_n от скважины должна быть равна критической скорости фильтрации:

$$v_\phi = \frac{Qz_{ст}P_{ст}T_{пл}}{2\pi hmR_n z_{ст}P_{ст}T_{пл}} = v_{кр}, \quad (5)$$

здесь m – пористость пласта, д.е.

Откуда

$$Q = \frac{2\pi hmR_n z_{ст}P_{ст}T_{пл}}{z_{ст}P_{ст}T_{пл}} v_{кр}. \quad (6)$$

Подставляя значение Q в (3) получаем:

$$\begin{aligned} P_k^2 - P_c^2 = & \left[\frac{zP_{ст}T_{пл}}{2\pi khT_{ст}} \ln\left(\frac{R_k}{R_n}\right) + A \right] \frac{2\pi hmR_n z_{ст}P_{ст}T_{пл}}{z_{ст}P_{ст}T_{пл}} v_{кр} + \\ & + B \left(\frac{2\pi hmR_n z_{ст}P_{ст}T_{пл}}{z_{ст}P_{ст}T_{пл}} v_{кр} \right)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Критерием справедливости линейного закона фильтрации служит число Рейнольдса [10], б/р:

$$Re = \frac{v_\phi a \rho}{\mu}, \quad (8)$$

где v_ϕ – скорость фильтрации, м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – коэффициент вязкости жидкости, Па·с; a – характерный размер пористой среды, м, который разные авторы определяют по-разному.

Если число Рейнольдса, определенное по формуле (8), не превосходит некоторого критического значения $Re_{кр}$, то линейный закон фильтрации Дарси сохраняется. Для вычисления значения критической скорости фильтрации существует ряд формул [4 и др.] различных авторов. В.Н. Щелкачев [4] определил диапазон значений $1 < Re_{кр} \leq 12$ при

$$a = \frac{10\sqrt{k}}{m^{2,3}}. \quad (9)$$

При расчете дебита газовой скважины находим значение критической скорости фильтрации, используя уравнения (9) и (8). Из нелинейного уравнения (7) находим неизвестное значение R_n , а затем из уравнения (6) искомое значение дебита скважины Q .

Результаты. Обсуждение

Проведем расчеты для совершенной газовой скважины [3, 6, 11–16] при следующих значениях исходных данных: толщина пласта $h=12$ м, проницаемость $k=10^{-12}$ м², пластовое давление $P_k=10$ МПа, плотность газа в стандартных условиях $\rho=0,8$ кг/м³, вязкость газа $\mu=4 \cdot 10^{-4}$ мПа·с, радиус контура питания $R_k=800$ м, радиус скважины $r_c=0,1$ м, коэффициент макрошероховатости $l=8,5 \cdot 10^{-4}$, коэффициент сверхсжимаемости в пластовых условиях $z=0,85$, коэффициент сверхсжимаемости в стандартных условиях $z_{ст}=0,8$, пластовая температура $T=303$ °K, стандартная температура $T_{ст}=293$ °K, пористость $m=0,2$.

Критическую скорость фильтрации в пластовых условиях из уравнения (8) получаем равную $v_{кр}=0,0015$ м/с. Для различных значений депрессии получаем следующие значения радиуса зоны нелинейной фильтрации R_n и дебит скважины Q (таблица).

Как видим, радиус зоны нелинейной фильтрации растет с увеличением депрессии на пласт. В формуле (5) при расчете критической скорости фильтрации следует учитывать также остаточную водонасыщенность, насыщенность коллектора конденсатом в призабойной зоне [17–21]. Поэтому в данных случаях радиус зоны нелинейной фильтрации будет больше. Расчетный дебит скважины по формулам (6) и (7) больше, чем по традиционной двучленной формуле.

С увеличением депрессии эта разница уменьшается. Для несовершенной скважины следует учесть также фильтрационные сопротивления, обусловленные перфорацией и несовершенством по степени вскрытия пласта [3, 13, 17].

Таблица. Результаты расчетов

Table. Results of the calculation

Депрессия, МПа Pressure drop, MPa	Радиус зоны нелинейной фильтрации, м Radius of the nonlinear filtration zone, m	Дебит скважины по формуле (7), м³/сут Well flow rate according to the formula (7), m³/day	Дебит скважины по традиционной формуле, м³/сут Well flow rate according to the traditional formula, m³/day	Отклонение результатов от традиционной формулы, % Deviation of results from the traditional formula, %
0,05	0,32	243000	161000	33,51
0,1	0,55	426000	306000	28,33
0,2	0,91	724000	559000	22,78
0,3	1,21	970000	780000	19,58
0,4	1,47	1180000	977000	17,42
0,5	1,70	1370000	1160000	15,83
0,6	1,91	1550000	1320000	14,59
0,7	2,10	1710000	1480000	13,60
0,8	2,28	1860000	1620000	12,79
0,9	2,45	2000000	1760000	12,10
1,0	2,61	2130000	1890000	11,51

По результатам расчетов построены индикаторные линии (ИЛ) [2, 17] для двух случаев: линейный+нелинейный закон и нелинейный закон (рис. 2).

Из уравнения (4) следует, что по сравнению с формулой нелинейного закона фильтрации (1) в нем изменились коэффициенты A и B . В абсолютном выражении наиболее значительно изменяется коэффициент A . Как видно из рис. 2, коэффициент A изменился на 30 % (пересечение графиков с осью ординат).

Было произведено сравнение индикаторных линий, построенных по двум формулам, с индикаторной линией, построенной по фактическим замерам. В качестве фактической была взята средняя индикаторная характеристика разведочной скважины пласта ПК₁ Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Усредненные по 10 разведочным скважинам исходные данные для расчетов ИЛ: проницаемость пласта $k=510 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, толщина пласта $h=17,2 \text{ м}$, перфорированная толщина $h_p=16,4 \text{ м}$, вязкость газа $\mu=10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$, коэффициент сверхсжимаемости $z=0,85$, пластовая температура $T=293 \text{ °K}$, плотность перфорации $n=12 \text{ отв/м}$, радиус перфорационных каналов $r_0=0,005 \text{ м}$, пластовое давление $P_k=6 \text{ МПа}$, радиус контура питания $R_k=800 \text{ м}$, радиус скважины $r_c=0,1 \text{ м}$.

Построены индикаторные линии для случаев: линейный+нелинейный законы, нелинейный закон, фактическая индикаторная линия (рис. 3).

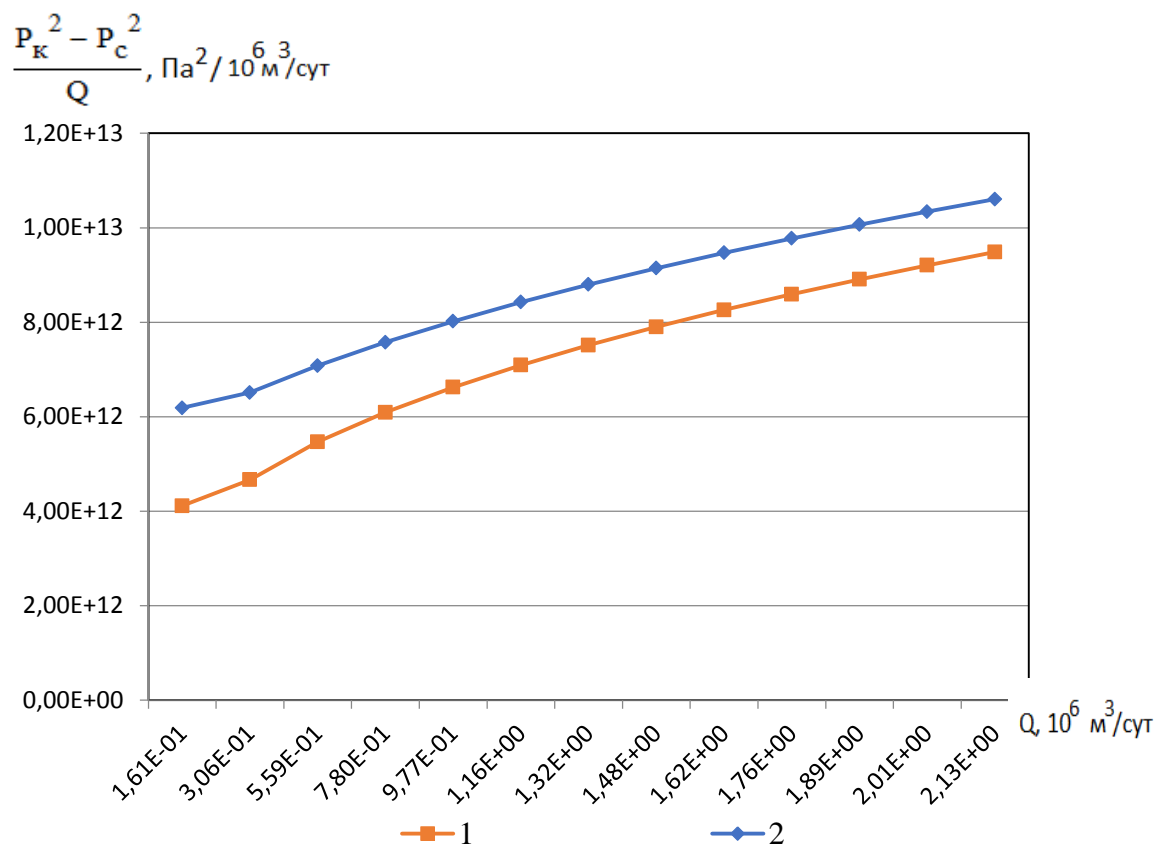


Рис. 2. Индикаторные линии: 1 – линейный+нелинейный законы; 2 – нелинейный закон

Fig. 2. Indicator lines: 1 – linear+non-linear laws; 2 – nonlinear law

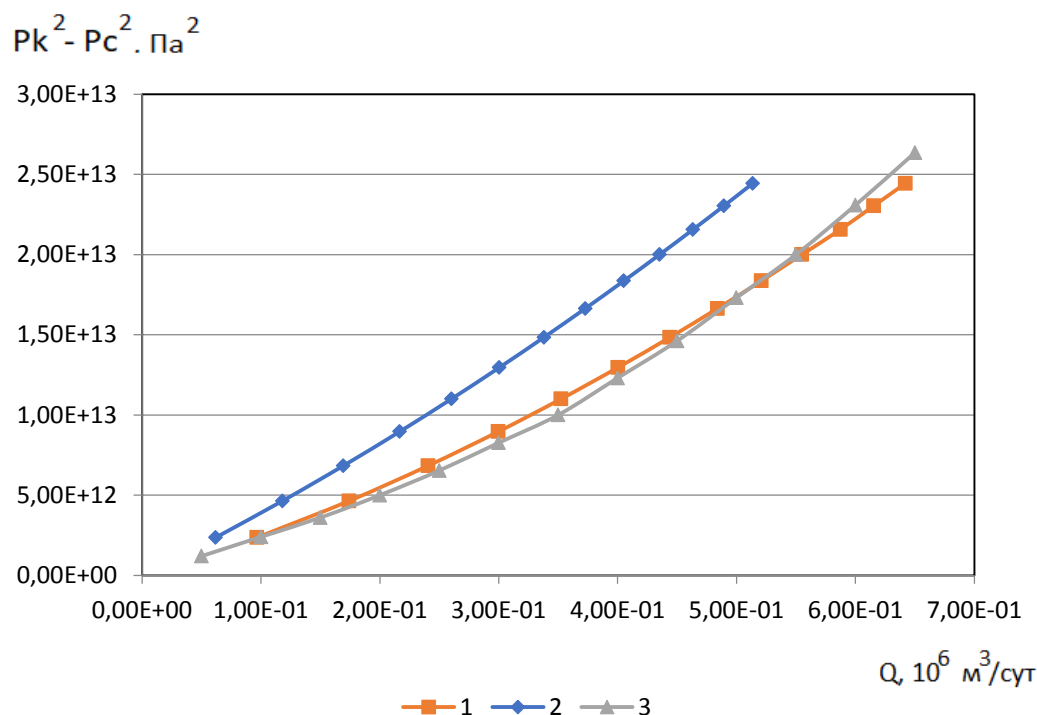


Рис. 3. Индикаторные линии в координатах $(P_k^2 - P_c^2; Q)$: 1 – линейный+нелинейный законы; 2 – нелинейный закон; 3 – фактическая для средней скважины пласта ПК₁ Бованенковского НГКМ

Fig. 3. Indicator lines in the coordinate $(P_k^2 - P_c^2; Q)$: 1 – linear+non-linear laws; 2 – nonlinear law; 3 – actual for the average well of the PK₁ formation of the bovanenkovsky field

Как видно из рис. 3, фактическая ИЛ и построенная по предлагаемой формуле показывают хорошее совпадение, в том числе по форме.

Выводы

1. Получена формула для расчета дебита газовой скважины, учитывающая размеры зоны нелинейной фильтрации газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минский Е.М. О турбулентной фильтрации в пористых средах // Сборник вопросов добычи, транспорта и переработки природных газов. – М.: Гостоптехиздат, 1951. – С. 74–78.
2. Алиев З.С. Об ошибочности классической теории фильтрации газа к скважине на стационарных режимах // НТЖ Технологии нефти и газа. – 2008. – № 4. – С. 60–64.
3. Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимова В.М. Подземная гидромеханика. – Ижевск: Изд-во АНО «Институт компьютерных исследований», 2005. – 488 с.
4. Основы технологии добычи газа / А.Х. Мирзаджанзаде, О.Л. Кузнецов, К.С. Басниев, З.С. Алиев. – М.: Недра, 2003. – 880 с.
5. Паникаровский В.В., Паникаровский Е.В. Эксплуатация газовых скважин на поздней стадии разработки месторождений // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2017. – № 5. – С. 85–89.
6. Щелкачев В.Н. Избранные труды. – М.: Недра, 1990. – Т. II. – 493 с.
7. Якупов Р.Р., Яркеева Н.Р. Оптимизация работы газовых скважин на Ямбургском нефтегазоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 3. – С. 41–49.
8. Технологические подходы к эксплуатации скважин в осложненных условиях / Е.В. Мандрик, С.А. Мельников, А.А. Плосков, В.И. Шулятиков, С.Г. Памужак // Нефтепромысловое дело. – 2018. – № 3. – С. 50–55.
9. Ермолаев А.И., Моисеев В.В., Шулятиков В.И. Методика выбора обводняющихся газовых скважин для применения газ-

2. По сравнению с традиционной трехчленной формулой изменяются фильтрационные коэффициенты A и B .
3. При равенстве радиуса зоны нелинейной фильтрации радиусу контура питания полученная формула совпадает с традиционной трехчленной формулой.
4. Предложенная формула может использоваться для обработки индикаторной линии.

- лифта // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2018. – № 1 (33). – С. 71–76.
10. Ушакова А.В. Обоснование режима работы горизонтальных газовых скважин // Вестник науки и образования. – 2019. – № 9-3 (63). – С. 12–14.
11. Попов Е.В., Тутушев Р.М., Савастюк С.С. Анализ динамики давления в процессе эксплуатации сеноманских газовых залежей южной части надым-пурской нефтегазоносной области // Газовая промышленность. – 2019. – № 1 (779). – С. 48–53.
12. Алиев Р.М., Курбанов Ш.М. Раннее прогнозирование самоглушения газовых и газоконденсатных скважин // Газовая промышленность. – 2020. – № 1 (795). – С. 46–49.
13. Barenblatt G.I., Lobkovsky L.I., Nigmatulin R.I. A mathematical model of gas outflow from gas-saturated ice and gas hydrates // Doklady Earth Sciences. – 2016. – V. 470. – № 2. – P. 1046–1049.
14. Joshi S.D., Horizontal and multi-lateral wells: performance analysis – an art or a science // Journal of Canadian Petroleum Technology. – October 2000. – V. 39. – № 10. – P. 19. 11
15. Joshi S.D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells // Journal of Petroleum Technology. – June 1988. – V. 40 № 6 – P. 729–739.12
16. Xiaoping L., Yun L. A new way to analyze productivity of gas wells // Nat Gas. – 2004. – V. 24. – P. 76–77.13
17. Chaudhry A. Gas well testing handbook // Nat Gas. – 2003. – V. 24. – P. 76–77.
18. Asadi M.B., Zendehboudi S. Evaluation of productivity index in unconventional reservoir systems: an extended distributed

- volumetric sources method // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2019. – V. 61. – P. 1–17.
19. Goode P.A., Kuchuk F.J. Inflow performance of horizontal wells // Society of Petroleum Engineers. 1991. URL: <https://doi.org/10.2118/21460-PA> (дата обращения 03.10.2020).
20. Dias-Couto L.E., Golan M. General inflow performance relationship for solution-gas reservoir wells // Society of Petroleum Engineers. 1982. URL: <https://doi.org/10.2118/9765-PA> (дата обращения 03.10.2020).
21. Jikhio S.A., Tiab D. Establishing inflow performance relationship (IPR) for gas condensate wells // Society of Petroleum Engineers. 2002. URL: <https://doi.org/10.2118/75503-MS> (дата обращения 03.10.2020).

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Сохошко С.К., доктор технических наук, профессор кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений Тюменского индустриального университета.

UDC 622.276

ACCOUNTING FOR CHANGES IN THE FILTRATION LAW WHEN CALCULATING THE FLOW RATE OF A GAS WELL

Sergey K. Sokhoshko,
sokhoshkosk@tyuiu.ru

Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance. For the time being, when calculating the flow rate of a vertical gas well, a trinomial formula is used, which discounts the fact that at cost-efficient flow rates there are two simultaneous zones around a vertical gas well, where each zone has its own Darcy's law. The extents of these zones depend both on the formation's permeability/porosity parameters and on formation's draw-down pressure.

The aim of the research is to determine a relationship between the flow rate of a vertical gas well and the formation's draw-down pressure, as well as the formation's permeability/porosity parameters, taking into account the extents of areas of linear and nonlinear gas flows.

Objects: gas formations and perfect gas well, laws of linear and non-linear gas flow.

Methods: analytical methods of subsurface hydrodynamics.

Results. Currently, to calculate a flow rate of a vertical gas well, the well-known trinomial formula is used. This formula implies that gas flow is governed by nonlinear law throughout the entire flow area starting from the well through to the external reservoir boundary. Whereas in reality, the law of nonlinear flow only occurs in a narrow area around the well. The extent of this area depends on the flow rate of the well, formation parameters, gas properties, etc. The use of analytical subsurface hydrodynamics methods enables to find formulas and an algorithm for calculating the flow rate of a gas well, as well as to determine flow coefficients, accounting for the extents of the non-linear flow areas. The radius of the nonlinear flow area can be determined from the derived equation taking into account the critical flow rate calculated based on the formation's permeability/porosity parameters. Equations of flow coefficients have been derived for the trinomial formula of the gas inflow to the well. The derived formula was used to calculate gas well production rate with various values of formation's draw-down pressure. The difference in calculation results of flow rates obtained using traditional versus the derived formula decreases after the draw-down pressure growth due to the increase in the extent of the non-linear flow area. Indicator charts are constructed according to the obtained and traditional formulas. Inflow performance relationship curves were plotted based on the derived and traditional formulas. Compared to the traditional trinomial formula, the equations for the A and B flow coefficients are changed, which now also account for the extents of the non-linear flow area.

Key words:

Vertical gas well, flow rate, trinomial formula, flow coefficients, laws of linear and nonlinear flow, critical flow rate.

REFERENCES

1. Minsky E.M. O turbulentnoy filtratsii v poristyykh sredakh [On turbulent filtration in porous media]. *Sbornik voprosov dobychi, transporta i pererabotki prirodnnykh gazov* [A collection of production, transportation and processing of natural gas]. Moscow, Gostoptekhizdat Publ., 1951. pp. 74–78.
2. Aliev Z.S. Ob oshibochnosti klassicheskoy teorii filtratsii gaza k skvazhine na statsionarnykh rezhimakh [On the error of the classical theory of gas filtration to the well in stationary modes]. *Technologies of oil and gas*, 2008, no. 4, pp. 60–64.
3. Basniev K.S., Kochina I.N., Maximov V.M. *Podzemnaya gidromekhanika* [Underground hydraulic engineering]. Izhevsk, Institute of computer research Publ. house, 2005. 488 p.
4. Mirzadzhanzade A.Kh., Kuznetsov O.L., Basniev K.S., Aliev Z.S. *Osnovy tekhnologii dobychi gaza* [Fundamentals of gas production technology]. Moscow, Nedra Publ., 2003. 880 p.
5. Panikarovskiy V.V., Panikarovskiy E.V. Exploitation of gas wells at the late stage of field development. *News of higher educational institutions. Oil and gas*, 2017, no. 5, pp. 85–89. In Rus.
6. Shchelkachev V.N. *Izbrannyye trudy* [Selected works]. Moscow, Nedra Publ., 1990. Vol. II. 493 p.
7. Yakupov R.R., Yarkееva N.R. Optimization of gas wells at the Yamburg oil and gas condensate field. *Oil and Gas business*, 2018, vol. 16, no. 3, pp. 41–49. In Rus.
8. Mandrik E.V., Melnikov S.A., Ploskov A.A., Shulyatkov V.I., Pamuzhak S.G. Technological approaches to the operation of wells in complicated conditions. *Oilfield business*, 2018, no. 3, pp. 50–55. In Rus.
9. Ermolaev A.I., Moiseev V.V., Shulyatkov V.I. Metodika vybora obvodnyayuschikhysya gazovykh skvazhin dlya primeneniya gazlifta [Method of selecting water-filled gas wells for gas lift application]. *Scientific and technical collection of gas science News*, 2018, no. 1 (33), pp. 71–76.
10. Ushakova A.V. Obosnovanie rezhima raboty gorizontalnykh gazovykh skvazhin [Justification of the mode of operation of horizontal gas wells]. *Bulletin of science and education*, 2019, no. 9-3 (63), pp. 12–14.
11. Popov E.V., Tugushev R.M., Savastuyuk S.S. Analysis of pressure dynamics during exploitation of Cenomanian gas deposits in the southern part of the Nadym-purskaya oil and gas bearing region. *Gas industry*, 2019, no. 1 (779), pp. 48–53. In Rus.
12. Aliyev R.M., Kurbanov Sh.M. Early prediction of self-extinguishing gas and gas condensate wells. *Gas industry*, 2020, no. 1 (795), pp. 46–49. In Rus.
13. Barenblatt G.I., Lobkovsky L.I., Nigmatulin R.I. A mathematical model of gas outflow from gas-saturated ice and gas hydrates. *Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 470, no. 2, pp. 1046–1049.
14. Joshi S.D. Horizontal and multi-lateral wells: performance analysis – an art or a science. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, October 2000, vol. 39, no. 10, pp. 19.
15. Joshi S.D. Augmentation of well productivity with slant and horizontal wells. *Journal of Petroleum Technology*, June 1988, vol. 40, no. 6, pp. 729–739.
16. Xiaoping L., Yun L. A new way to analyze productivity of gas wells. *Nat Gas*, 2004, vol. 24, pp. 76–77.
17. Chaudhry A. Gas well testing handbook. *Nat Gas*, 2003, vol. 24, pp. 76–77.
18. Asadi M.B., Zendehboudi S. Evaluation of productivity index in unconventional reservoir systems: an extended distributed volumetric sources method. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, vol. 61, pp. 1–17.
19. Goode P.A., Kuchuk F.J. Inflow performance of horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers*, 1991. Available at: <https://doi.org/10.2118/21460-PA> (accessed 3 October 2020).
20. Dias-Couto L.E., Golan M. General inflow performance relationship for solution-gas reservoir wells. *Society of Petroleum*

- Engineers*, 1982. Available at: [https:// doi.org/10.2118/9765-PA](https://doi.org/10.2118/9765-PA) (accessed 3 October 2020).
2002. Available at: <https://doi.org/10.2118/75503-MS> (accessed 3 October 2020).
21. Jokhio S.A., Tiab D. Establishing inflow performance relationship (IPR) for gas condensate wells. *Society of Petroleum Engineers*,
Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Sergey K. Sokhoshko, Dr. Sc., professor, Tyumen Industrial University.

УДК 622.276

ПЛАНИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО ЗАВОДНЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНИЗОТРОПНОЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КАРБОНАТНОЙ ЗАЛЕЖИ ГАГАРИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Мартюшев Дмитрий Александрович¹,
martyushevdm@inbox.ru

Менгалиев Александр Генрихович^{1,2},
mengaliev.alexandr@gmail.com

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, 614990, г. Пермь, пр. Комсомольский, 29.

² ТПП «Ямалнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»,
Россия, 629008, г. Салехард, ул. Матросова, 24.

Актуальность. На сегодняшний день одной из актуальных и важнейших задач в нефтяной отрасли является увеличение конечного коэффициента извлечения нефти. Большое внимание сейчас уделяется так называемым гидродинамическим методам повышения коэффициента нефтеизвлечения. Одним из наиболее простых, недорогих и часто применяемых гидродинамических методов является циклическое заводнение. Весьма важной как с научной, так и с практической точки зрения задачей является возможность использования циклического заводнения в сложнопостроенных коллекторах с низкими фильтрационно-емкостными свойствами, к разработке которых начали приступать большинство нефтяных компаний. На данный момент, чтобы оценить эффективность технологии, а также избежать нежелательных последствий при ее использовании, применяют гидродинамическое моделирование. Для решения данной задачи использовалась адаптированная геолого-гидродинамическая модель, учитывающая трещиноватость и параметр анизотропии проницаемости, турнейско-фаменской залежи Гагаринского месторождения.

Цель: оценить возможности реализации циклического заводнения на основе модифицированной геолого-гидродинамической модели, учитывающей геомеханические эффекты.

Объект: сложнопостроенная турнейско-фаменская карбонатная залежь Гагаринского месторождения.

Методы: гидродинамический симулятор Tempest версии 8.3.1 компании Roxar.

Результаты. Выполненное моделирование циклического заводнения на определенных участках залежи Гагаринского месторождения продемонстрировало уменьшение добычи воды, сопровождающееся увеличением добычи нефти. Также необходимо отметить, что переход со стационарного на циклическое заводнение не на все реагирующие добывающие скважины оказал положительное влияние (увеличение добычи нефти), связано это в большей мере с наличием вертикальной проницаемости (параметра анизотропии проницаемости). Также подтверждено, что упущение параметра анизотропии проницаемости и наличие естественной трещиноватости в геолого-гидродинамических моделях приводит к завышению параметра накопленной добычи нефти.

Ключевые слова:

Трещиноватость, вертикальная проницаемость, дополнительная добыча нефти, обводненность, полувцикл, фильтрационный поток.

Введение

На сегодняшний день одна из актуальных и важнейших задач в нефтяной отрасли – увеличение конечного коэффициента извлечения нефти, которая требует применения эффективных методов разработки. Большое внимание сейчас уделяется так называемым гидродинамическим методам повышения коэффициента нефтеизвлечения. Данные методы связаны с изменением величины и/или направления градиентов пластового давления. Одним из наиболее простых, недорогих и часто применяемых гидродинамических методов является циклическое заводнение. В работах [1, 2] говорится, что повышение градиентов давлений в пласте оказывает положительное влияние на коэффициент нефтеотдачи неоднородных коллекторов и приводит к снижению обводненности добывающих скважин.

Эффективность циклического заводнения зависит от двух процессов, которые являются взаимосвязанными – за счет перепадов давления происходит внедрение воды в малопроницаемые пропластки и удер-

жание ее там за счет капиллярных сил. Одним из наиболее важных геолого-физических критериев применимости циклического заводнения является неоднородность пласта. Разнонаправленная трещиноватость карбонатных пластов обуславливает интенсивный обмен пластового флюида между пропластками (слоями) и тем самым увеличивает эффективность метода. Особо стоит отметить, что не только возникающие градиенты давления играют главную роль во внедрении воды в малопроницаемые пропластки пласта, но и наличие проницаемости в вертикальном направлении [3, 4].

В настоящее время проектирование разработки сложнопостроенных карбонатных коллекторов реализуется на основе трехмерного компьютерного моделирования. В работах [5, 6] рассматривается моделирование циклического заводнения на основе синтетических (упрощенных) геолого-гидродинамических моделей, но стоит отметить, что они не описывают в полной мере процессы, происходящие в пластах, осо-

бенно в сложнопостроенных карбонатных, характеризующихся наличием трещиноватости и анизотропией фильтрационных свойств. Логичным этапом развития подходов, используемых при проектировании циклического заводнения, является совершенствование геолого-гидродинамических моделей, которые учитывали бы все (или большинство) особенности карбонатных залежей. В работе [7] говорится, что введение в геолого-гидродинамическую модель значений вертикальной и латеральной анизотропии проницаемости имеет существенное влияние на поведение коллектора.

Главная цель данной работы, которую преследовали авторы, была в возможности подключения к дренированию ранее не охваченных процессом заводнения низкопроницаемых пропластков и запасов, сосредоточенных в застойных зонах, путем оптимизации системы поддержания пластового давления (ППД). Используя технологию циклического заводнения, возможно добиться существенного снижения количества попутно добываемой воды при одновре-

менном увеличении добычи нефти за счет использования ранее не дренируемых участков залежи.

Геолого-физическая характеристика турнейско-фаменского объекта

На данный момент, чтобы оценить эффективность технологии, а также избежать нежелательных последствий при ее использовании, применяют гидродинамическое моделирование. Для решения данной задачи использовалась адаптированная геолого-гидродинамическая модель, учитывающая трещиноватость и анизотропию проницаемости, турнейско-фаменской залежи Гагаринского месторождения (рис. 1). Методика определения параметра анизотропии проницаемости и параметров естественной трещиноватости по данным гидродинамических исследований (кривая восстановления давления/уровня), их динамика в процессе разработки (при изменении пластового и забойного давлений) и их учет в геолого-гидродинамической модели описаны в работах [8, 9], поэтому в данной статье на этом не заострено особого внимания.

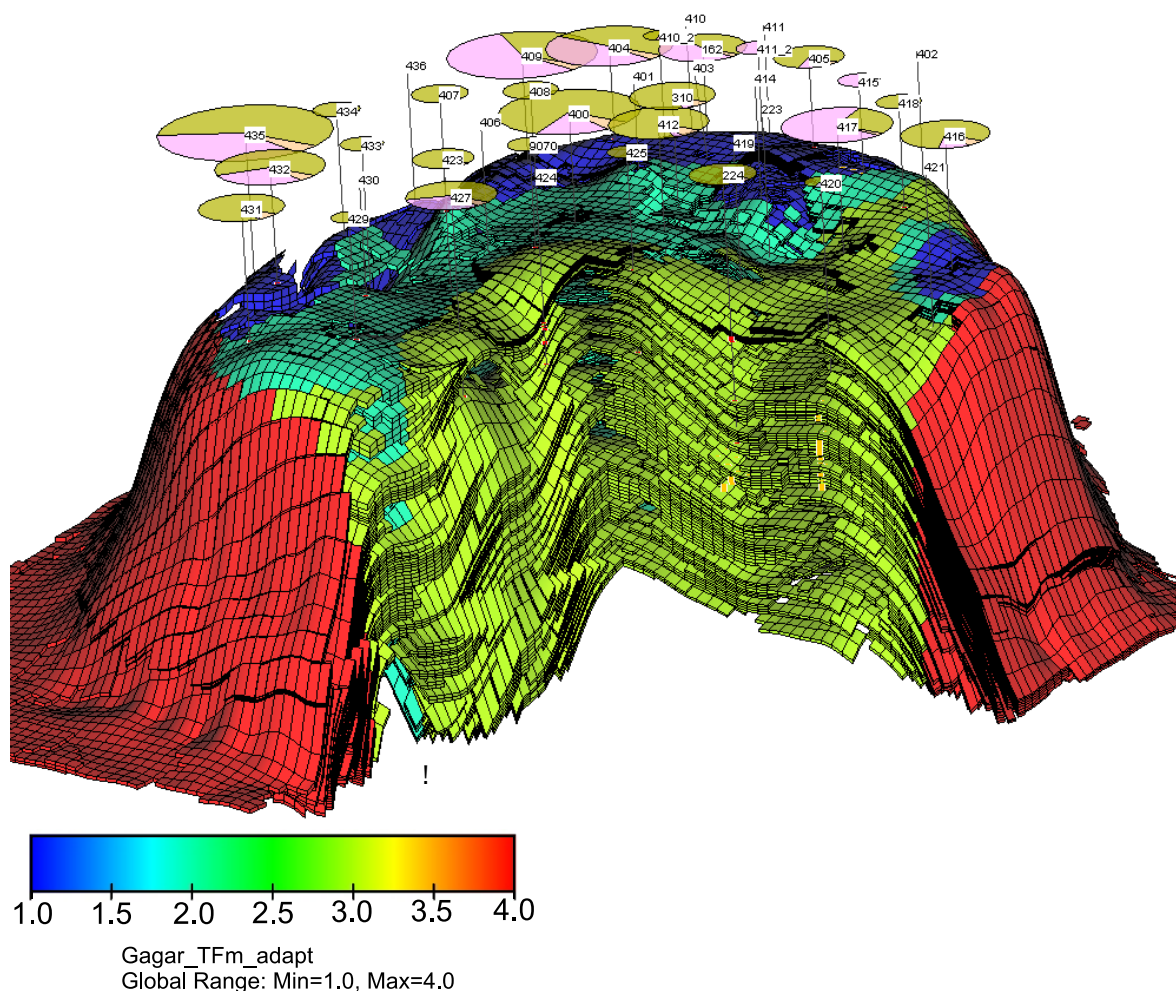


Рис. 1. Внешний вид модифицированной геолого-гидродинамической модели фаменской залежи Гагаринского месторождения. Горизонтально ориентированные овалы – это текущие отборы скважин с указанием в центре номера скважины; различными цветами выделены литолого-фациальные зоны турнейско-фаменской залежи

Fig. 1. Appearance of a modified geological and hydrodynamic model of the Famennian deposit of the Gagarinskoye field. Horizontally oriented ovals are the current well selections with the number of the well in the center; lithologic-facies zones of the Tournaisian-Famennian deposits are highlighted in different colors

Таблица 1. Геолого-физическая характеристика объекта
Table 1. Geological and physical characteristics of the object

Параметр/Parameter	Значение/Value
Средняя глубина залегания, м Average depth, m	2001,0
Пористость/Porosity, %	11,0
Проницаемость, мД/Permeability, mD	39,0
Средняя эфф. нефтенас. толщина, м Average net pay thickness, m	12,3
Вязкость нефти в пл. усл., МПа*с Oil viscosity at reservoir conditions, MPa * c	1,13
Газосодержание, м ³ /т Gas content, m ³ /t	185,6
Пластовое давление начальное, МПа Initial reservoir pressure, MPa	20,7
Давление насыщения, МПа Saturation pressure, MPa	14,4
Коэффициент расчлененности, д. ед. Dissection coefficient, fraction of units	19,8
Коэффициент песчанистости, д. ед. Sandiness coefficient, fraction of units	0,21

Основные геолого-физические характеристики рассматриваемого объекта представлены в табл. 1. В целом стоит отметить, что по залежи средний дебит по нефти составляет 6,8 т/сут; по жидкости – 11,1 м³/сут; обводненность – 37,8 %; степень выработки запасов нефти – 43,4 %.

Для моделирования циклического заводнения выбраны три очага заводнения – район скв. 223, 406 и 430, которые расположены в зоне верхнего тылового шлейфа (рис. 2). Проведенный анализ геологического строения и текущего состояния разработки залежи позволяет сделать вывод о неравномерной выработке запасов нефти (особенно в зоне верхнего тылового шлейфа) ввиду высокой неоднородности коллектора (по площади и по разрезу), а также значительного влияния естественной трещиноватости и как следствие образования промытых зон. Таким образом, большая часть запасов в низкопроницаемых зонах остается не охваченной нагнетаемой водой [10–12].

Стоит отметить, что на залежи наблюдается отрицательная динамика пластового давления в зонах отбора в процессе эксплуатации, связано это в первую очередь с недостаточной компенсацией темпов отбора со стороны системы ППД и ее низкой эффективностью. Во многом этому способствует сложная трещиноватая структура пласта и многообразие фациальных зон в пределах рифового массива, между которыми может происходить как переток флюида, так и барьерное сопротивление. Проведенные трассерные исследования в апреле 2018 г. позволили подтвердить, что влияние закачиваемой воды на добывающий фонд низкое (на рис. 2 синими стрелками указаны основные направления закачиваемой воды по результатам трассерных исследований), но, стоит отметить, что практически все добывающие скважины в той или иной степени имеют гидродинамическую связь с нагнетательными.

Моделирование циклического заводнения

Исходя из имеющегося опыта проектирования [13–19] длительность полуцикла рекомендуется оцениваться с помощью следующей формулы:

$$t = \frac{l^2}{2\chi},$$

где t – длительность полуцикла; l – расстояние от нагнетательной скважины до фронта вытеснения нефти водой; χ – пьезопроводность пласта между добывающей и нагнетательной скважинами. В работах [20–22] сказано, что параметр пьезопроводности достаточно точно определяется прямым методом – гидропрослушивания. Но данный метод является длительным и дорогостоящим. Поэтому определение данного параметра осуществлялось с помощью интерпретации данных гидродинамических исследований скважин (кривая восстановления давления/уровня, кривая стабилизации давления) как наиболее распространенного метода контроля за разработкой месторождений [23–25].

Из представленной формулы видно, что для каждой добывающей скважины длительность полуцикла будет индивидуальна и в большей мере зависеть от пьезопроводности пласта (табл. 2).

Таблица 2. Определение длительности полуцикла добывающих скважин, расположенных в очаге нагнетательной скв. 430
Table 2. Determination of duration of a half-cycle of producing wells located in the area of the injection well 430

Добывающая скважина Production well	Расстояние до нагнетательной скважины, м Distance to the injection well, m	Пьезопроводность, см ² /с Piezoconductivity, cm ² /s	Длительность полуцикла, сут Half cycle duration, days
423	356	93,3	19,7
427	445	167,4	17,1
429	445	143,1	20,0
431	534	93,2	44,3
432	445	277,4	10,3
433	445	7,2	397,9

Для каждого из трех обозначенных на рис. 1 очагов заводнения смоделирована циклическая закачка с различной длительностью полуцикла. Циклическую закачку в гидродинамическом симуляторе можно проводить различными способами – менять режим работы нагнетательной скважины, задавая периоды работы/простоя, но в результате получается довольно громоздкий файл прогнозных событий. Авторами работы циклическая закачка реализована через использование операций встроенного модуля с различными условиями, содержащего элементы программирования. В итоге реализация различных сценариев работы сводится к корректировке нескольких чисел. В результате моделирования циклической закачки получены следующие значения технологических параметров, которые представлены в табл. 3. Расчет циклического заводнения проводился на период 20 лет. В ряде работ [26–29] рекомендуется изменять режимы эксплуатации скважин и в этих случаях рассчитывать на высокую эффективность циклического заводнения. Но в практических условиях создание амплитуд изменения закачки невозможно ввиду технических ограничений системы ППД Гагаринского месторождения, поэтому данный вариант технического решения не моделировался.

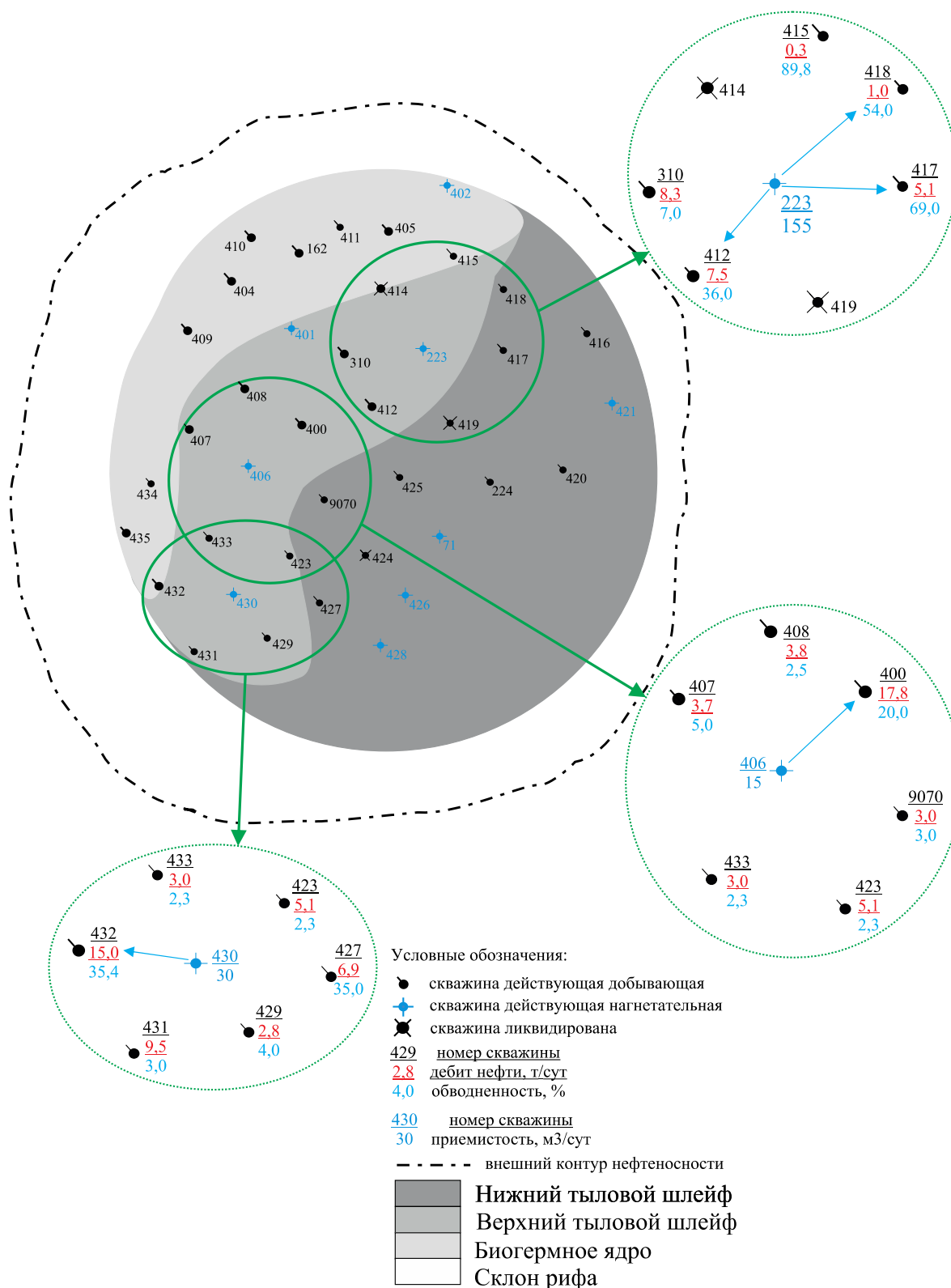


Рис. 2. Фациальная схема карбонатной залежи Гагаринского месторождения с выделенными очагами для возможной реализации циклической закачки

Fig. 2. Facies diagram of carbonate deposit of Gagarinskoye field – dedicated foci waterflood for cyclic injection realizable

Таблица 3. Результаты расчетов технологической эффективности циклического заводнения по очагам нагнетания
Table 3. Results of waterflooding cyclic technological efficiency calculation by injection areas

Скв. № Well no.	Полуцикл, дни Half cycle, days	Накопленная добыча нефти, тыс. т Cumulative oil production, thousand tons	Обводненность, % Water cut, %	Накопленная добыча жидкости, тыс. м³ Cumulative fluid production, thousand m³	Накопленная закачка агента, тыс. м³ Cumulative agent injection, thousand m³
223	Базовый* Basic	431,75	88,46	881,09	1573,61
	5/5	428,73	84,20	770,07	800,28
	10/10	429,14	85,60	776,80	853,07
	20/20	429,41	85,12	783,01	908,24
	40/40	429,67	85,53	788,23	946,10
406	Базовый Basic	267,66	60,63	456,68	37,15
	5/5	271,54	54,74	428,94	11,23
	10/10	264,78	59,48	444,67	13,24
	20/20	265,16	59,57	445,93	15,82
	40/40	233,55	60,79	394,44	16,83
430	Базовый Basic	329,21	79,87	567,19	143,07
	5/5	333,23	70,40	531,97	52,35
	10/10	325,02	71,55	541,81	60,50
	20/20	325,77	72,38	543,38	67,79
	40/40	326,25	72,99	544,57	72,56

*Стационарное заводнение.

*Stationary flooding.

Данные табл. 3 говорят о том, что реализация циклического заводнения в очаге скв. 223 является менее эффективной по сравнению со стационарной закачкой. Скорее всего, это связано с активной выработкой запасов и значительно меньшими остаточными извлекаемыми запасами по сравнению с другими рассматриваемыми очагами. На двух других очагах при реализации циклического заводнения с длительностью полуцикла 5/5 технологическая эффективность выше, чем при стационарном заводнении (в среднем на 1,3 %). Также необходимо отметить значительное снижение обводненности добываемой продукции в рассматриваемых очагах нагнетания (в среднем на 10 %). В целом реализация циклического заводнения на данных участках с определенным временным циклом является технологически эффективным мероприятием.

Проведено сравнение технологической эффективности реализации циклического заводнения на модифицированной геолого-гидродинамической модели и стандартной, без учета геомеханических эффектов (табл. 4). Полученные результаты указывают на то, что учет трещиноватости и параметра анизотропии проницаемости в геолого-гидродинамических моделях сложнопостроенных карбонатных объектов ведет к завышению технологических показателей, что в последствии может привести к неверной экономической оценке проекта.

Для очагов нагнетания (скв. 406, 430), для которых циклическое заводнение является эффективным, рассмотрено в отдельности влияние закачки на каждую добывающую скважину (табл. 5, 6) с целью оценки изменения накопленной добычи нефти.

Таблица 4. Сравнение результатов циклического заводнения
Table 4. Comparison of cyclic flooding results

Скв. № Well no.	Полуцикл, дни Half cycle, days	Модифицированная геолого-гидродинамическая модель Modified geological and hydrodynamic model		Геолого-гидродинамическая модель без учета геомеханических эффектов Geological and hydrodynamic model without taking into account geomechanical effects	
		Накопленная добыча нефти, тыс. т Cumulative oil production, thousand tons	Обводненность, % Water cut, %	Накопленная добыча нефти, тыс. т Cumulative oil production, thousand tons	Обводненность, % Water cut, %
406	Базовый Basic	267,66	60,63	277,54	67,44
	5/5	271,54	54,74	278,21	67,34
	10/10	264,78	59,48	275,88	65,22
	20/20	265,16	59,57	274,91	65,12
	40/40	233,55	60,79	272,45	66,04
430	Базовый Basic	329,21	79,87	345,67	84,61
	5/5	333,23	70,40	347,24	84,12
	10/10	325,02	71,55	339,55	82,45
	20/20	325,77	72,38	338,46	80,12
	40/40	326,25	72,99	334,67	82,34

Таблица 5. Результаты расчетов технологической эффективности циклического заводнения (очаг скв. 430)

Table 5. Results of calculation of technological efficiency of waterflood for cyclic injection (area of well 430)

Скв. № Well no.	Накопленная добыча нефти, тыс. т Cumulative oil production, thousand tons		Абсолютное изменение добычи нефти, тыс. т Absolute change in oil production, thousand tons
	Базовый Basic	Цикл 5/5 5/5 cycle	
423	44,06	44,05	-0,01
427	28,99	29,32	+0,33
429	24,47	24,67	+0,20
431	75,39	75,20	-0,19
432	71,04	70,42	-0,62
433	21,30	21,76	+0,46

Таблица 6. Результаты расчетов технологической эффективности циклического заводнения (очаг скв. 406)

Table 6. Results of calculation of technological efficiency of waterflood for cyclic injection (area of well 406)

Скв. № Well no.	Накопленная добыча нефти, тыс. т Cumulative oil production, thousand tons		Абсолютное изменение добычи нефти, тыс. т Absolute change in oil production, thousand tons
	Базовый Basic	Цикл 5/5 5/5 cycle	
400	64,20	55,49	-8,71
407	40,26	41,12	+0,86
408	50,06	49,87	-0,19
423	44,06	50,64	+6,58
433	21,30	22,96	+1,66
9070	91,96	92,54	+0,58

Для качественной оценки циклического заводнения применена опция трассеров, позволяющая визуально отследить направление движения закачиваемых агентов. Применение трассеров не заканчивается визуальной оценкой, их широко применяют для реали-

зации закачки поверхностно-активных веществ (ПАВ) и других методов повышения нефтеотдачи пластов [30–37]. На рис. 3 изображено графическое распределение потоков закачиваемого агента по очагу нагнетательной скважины 406.

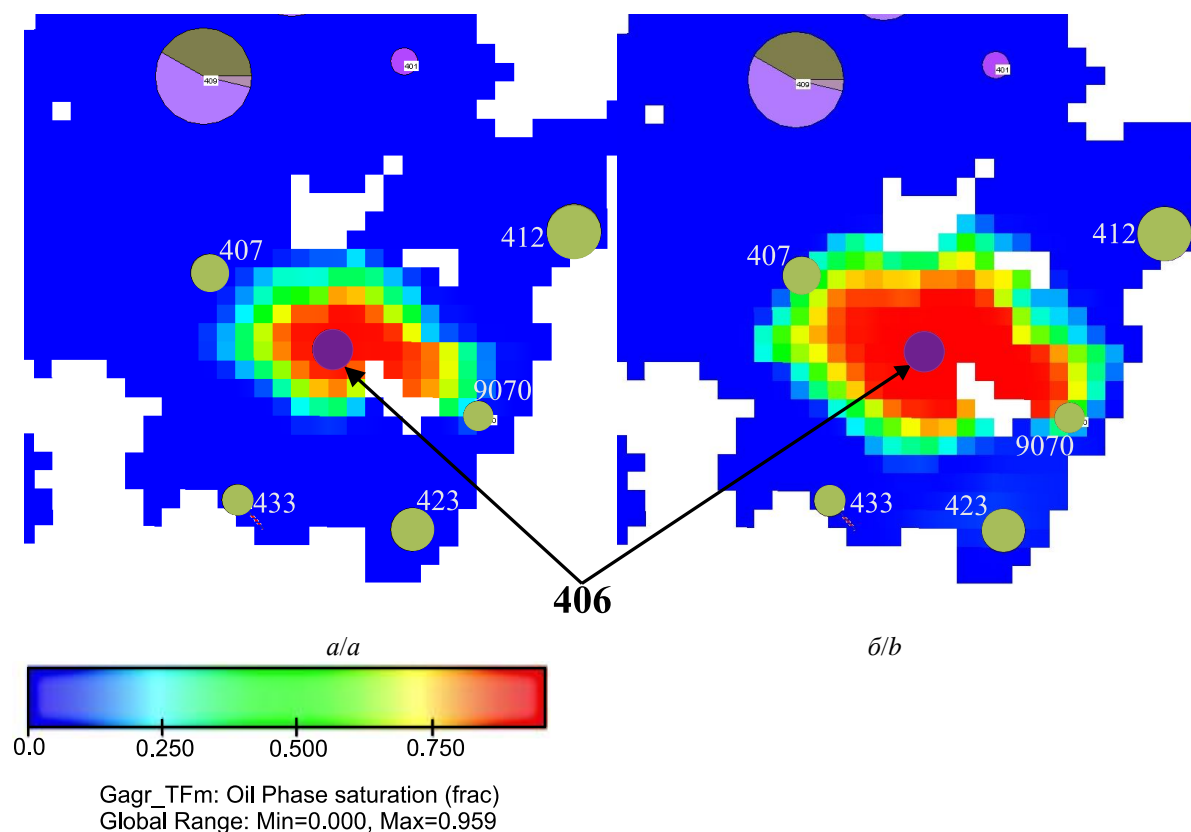


Рис. 3. Графическое распределение фильтрационных потоков закачиваемого агента на примере очага скв. 406, 74-ый слой гидродинамической модели; а) реализация циклического заводнения с длительностью полуцикла 5/5; б) стационарное заводнение

Fig. 3. Graphical distribution of filtration flows of the injected agent on an example of well 406, hydrodynamic model layer 74; а) implementation of the waterflood for cyclic injection with the half cycle duration of 5/5; b) stationary waterflood

Исходя из проведенных расчетов и графической визуализации можно сделать вывод о том, что использование геолого-гидродинамической модели,

учитывающей геомеханические эффекты, позволяет более достоверно и качественно оценить влияние циклического заводнения на выработку запасов из

ранее не охваченных процессом заводнения пропластков.

Также подтвержден тот факт, что длительность полуцикла, при котором достигается максимальный технологический эффект (дополнительная добыча нефти), зависит от параметра анизотропии проницаемости: чем больше значение латеральной проницае-

мости (меньше коэффициент анизотропии проницаемости пласта ($v = \frac{K_{\text{верт}}}{K_{\text{гор}}}$)), тем больше времени необходимо для перераспределения давления в вертикальном направлении, следовательно, время полуцикла увеличивается (рис. 4) [7–9].

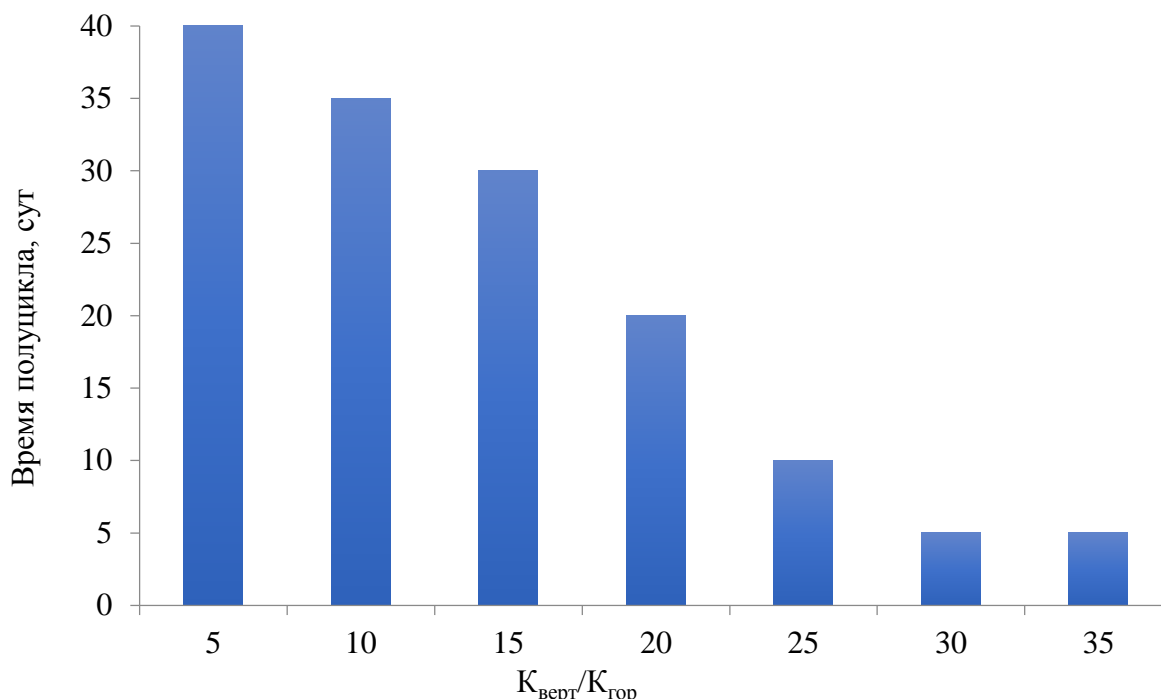


Рис. 4. Зависимость полуцикла циклического заводнения от коэффициента анизотропии проницаемости
Fig. 4. Dependence of the half cycle of waterflood for cyclic injection on the permeability anisotropy coefficient

Заключение

На сегодняшний день гидродинамическое моделирование является одним из наиболее применяемых и главных инструментов для обоснования решений по управлению разработкой нефтяных месторождений. Модели фильтрации позволяют более эффективно прогнозировать и визуализировать потоки пластовых флюидов.

Выполненное моделирование циклического заводнения на определенных участках залежи продемонстрировало уменьшение добычи воды, сопровождающееся увеличением добычи нефти. Также необхо-

димо отметить, что переход со стационарного на циклическое заводнение не на все реагирующие добывающие скважины оказал положительное влияние (увеличение добычи нефти), связано это в большей мере с наличием вертикальной проницаемости (параметра анизотропии проницаемости).

Результаты, описанные в статье, представляют научный и практический интерес, позволяют в дальнейшем развивать и совершенствовать геолого-гидродинамическое моделирование и проектирование различных видов заводнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шарбатова И.Н., Сургучев М.Л. Циклическое воздействие на неоднородные нефтяные пласты. – М.: Недра, 1988. – 121 с.
2. Грачев С.И., Коротенко В.А., Кушакова Н.П. Исследование влияния трансформации двухфазной фильтрации на формирование зон невыработанных запасов нефти // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 241. – С. 68–82.
3. Технические решения по оценке обводненности продукции нефтедобывающих скважин / И.З. Денисламов, И.К. Гималтдинов, А.И. Денисламова, З.А. Максудов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 9. – С. 60–69.
4. Альмухаметова Э.М. Расширение опыта применения технологии нестационарного заводнения с применением технологии изменения направления фильтрационного потока на примере месторождения Северные Бузачи // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 2. – С. 115–121.
5. Максимов В.М. Обобщенный закон многофазной фильтрации и новые эффекты поверхностных явлений при двухфазных течениях в пористой среде // Георесурсы. – 2020. – Т. 21. – № 1. – С. 86–91.
6. Боженюк Н.Н., Белкина В.А., Стрекалов А.В. Геологическая модель викуловских отложений с учетом анализа связности коллектора и данных по горизонтальным скважинам // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 4. – С. 30–44.
7. Построение анизотропной гидродинамической модели и исследование влияния анизотропии проницаемости на примере моделирования блока месторождения / Р.И. Ермаков, М.О. Коровин, В.П. Меркулов, О.С. Чернова // Известия Том-

- ского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 86–93.
8. Мартюшев Д.А. Совершенствование геолого-гидродинамической модели карбонатного нефтяного объекта путем учета параметра анизотропии проницаемости // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 243. – С. 313–318.
9. Особенности учета анизотропии проницаемости в гидродинамической модели / Р.И. Ермаков, В.П. Меркулов, О.С. Чернова, М.О. Коровин // Записки Горного Института. – 2020. – Т. 243. – С. 299–304.
10. Мартюшев Д.А., Зайцев Р.А. Влияние петрофизических параметров рифогенных карбонатных коллекторов нефтяных месторождений турнейско-фаменских отложений Верхнего Прикамья на продуктивность добывающих скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 11. – С. 77–85.
11. Чумаков Г.Н. Оценка вероятности эффективного применения циклической закачки жидкости в пласт на месторождениях Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13. – № 13. – С. 49–58.
12. Чеботарева И.Я. Эмиссионная сейсмическая томография – инструмент для изучения трещиноватости и флюидодинамики земной коры // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 238–245.
13. Исследования о наличии гидродинамической связи между терригенным бобриковским и карбонатным турнейским объектами на базе геолого-технологической модели участка месторождения / М.А. Сайфутдинов, И.Н. Хакимзянов, В.Н. Петров, Р.И. Шешдинов, Л.М. Миронова // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 1. – С. 2–8.
14. Гусев С.И. Результаты петроупругого моделирования карбонатных отложений пермской системы Харьягинского месторождения // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 62–68.
15. Концептуальное геологическое моделирование как основа разработки карбонатных залежей на примере месторождения ближневосточного региона / Р.А. Растегаев, В.В. Морозов, С.И. Мельников, С.А. Идрисова, С.В. Милячков // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 3. – С. 168–171.
16. Фациальные модели ачимовской толщи восточно-уренгойского лицензионного участка как основа для оптимизации систем разведки и разработки / А.В. Храмова, С.И. Пахомо, Н.Ю. Натчук, М.П. Калашникова, С.В. Ромашкин, А.Д. Мусихин, Н.Г. Семенова // Георесурсы. – 2020. – Т. 22. – № 3. – С. 55–61.
17. Experimental study on pressure control strategies for improving waterflooding potentials in a heavy oil-methane system / Xiaolong Peng, Fanhua Zeng, Zhongwei Du, Hao Yang // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 149. – P. 126–137.
18. Designing cyclic pressure pulsing in naturally fractured reservoirs using an inverse looking recurrent neural network / E. Artun, T. Ertekin, R. Watson, B. Miller // Computers and Geosciences. – 2012. – V. 38. – Iss. 1. – P. 68–79.
19. Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 153. – P. 178–186.
20. Белоногов Е.В., Коровин А.Ю., Яковлев А.А. Повышение коэффициента приемистости путем динамической обработки нагнетательных скважин // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 238. – С. 405–409.
21. Three-dimensional physical modeling of waterflooding in metamorphic fractured reservoirs / Kaijun Tong, Huiqing Liu, Yingchun Zhang, Jing Wang // Petroleum Exploration and Development. – 2015. – V. 42. – Iss. 4. – P. 589–596.
22. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: A mechanism study / Chenjun Huang, Geyun Liu, Kaibo Shi, Jinyin Yin, Jinrui Guo, Chongzhi Tao // Petroleum Research. – 2020. – V. 5. – Iss. 2. – P. 124–130.
23. Huafeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 419–429.
24. A permeability model for naturally fractured carbonate reservoir / V. Guerriero, S. Mazzoli, A. Iannace, S. Vitale, Ch. Strauss // Marine and Petroleum Geology. – 2013. – V. 40. – P. 115–134.
25. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: A modeling study / Chenjun Huang, Geyun Liu, Yongsheng Ma, Xinqi Zhou, Linyan Zhang, Jinyin Yin, Jinrui Guo // Petroleum Research. – 2019. – V. 4. – Iss. 4. – P. 354–364.
26. Experimental study of impact of anisotropy and heterogeneity on gas flow in coal. P. II: Permeability / Yuling Tan, Zhejun Pan, Jishan Liu, Fubao Zhou, Asadul Haque // Fuel. – 2018. – V. 230. – P. 397–409.
27. Investigation log the permeability anisotropy of 2D fractured rock masses / Feng Ren, Guowei Ma, Luoyang Fu, Ke Zhang // Engineering geology. – 2015. – V. 196. – P. 171–182.
28. Xinmin Song, Yong Li. Optimum development options and strategies for water injection development of carbonate reservoirs in the Middle East // Petroleum Exploration and Development. – 2018. – V. 45. – Iss. 4. – P. 723–734.
29. Minory Sato, Takato Takemura, Manabu Takahashi. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2018. – V. 108. – P. 118–127.
30. Velocity-free MS/AE source location method for three-dimensional hole-containing structures / Lomgjun Dong, Qingchun Hu, Xiaojie Tong, Youfang Liu // Engineering. – 2020. – V. 6. – Iss. 7. – P. 827–834.
31. Characterization of reactive interfaces via coupled interfacial tension measurements and interphase mass transfer analysis / Saeid Dowlati, Aliyar Javadi, Reinhard Miller, Alireza Bahramian // Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects. – 2020. – V. 609. – P. 125711.
32. Carbonate rocks resistivity determination using dual and triple porosity conductivity models / Zeeshan Tariq, Mohamed Mahmoud, Hasan Al-Youssef, Mohammad Rasheed Khan // Petroleum. – 2020. – V. 6. – Iss. 1. – P. 35–42.
33. Mohammad Ali Ahmadi, Zhangxing Chen. Comparison of machine learning methods for estimating permeability and porosity of oil reservoirs via petro-physical logs // Petroleum. – 2019. – V. 5. – Iss. 3. – P. 271–284.
34. Mohamed A. Kassab, Ali Abbas, Ahmed Ghanima. Petrophysical evaluation of clastic Upper Safa Member using well logging and core data in the Obaiyed field in the Western Desert of Egypt // Egyptian Journal of Petroleum. – 2020. – V. 29. – Iss. 2. – P. 141–153.
35. Source rock evaluation of shale intervals of the Kurra Chine Formation, Kurdistan Region-Iraq: an organic geochemical and basin modeling approach / Ayad N.F. Edilbi, Kamal Kolo, Nechirvan R. Muhammed, Salman R. Yasin, Wrya J. Mamaseni, Rivan Akramd // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 4. – P. 315–321.
36. Mohamed A. Kassab, Andreas Weller. Anisotropy of permeability, P-wave velocity and electrical resistivity of Upper Cretaceous carbonate samples from Tushka Area, Western Desert, Egypt // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 2. – P. 189–196.
37. Shedid A. Vertical-horizontal permeability correlations using coring data // Egyptian Journal of Petroleum. – 2019. – V. 28. – Iss. 1. – P. 97–101.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Мартюшев Д.А., кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Менгалиев А.Г., ведущий инженер группы внедрения и сопровождения интегрированной модели, ТПП «Ямалнефтегаз» ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь»; аспирант кафедры нефтегазовых технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета.

UDC 622.276

PLANNING OF CYCLIC WATERING BASED ON ANISOTROPIC HYDRODYNAMIC MODEL OF THE CARBONATE DEPOSIT OF GAGARINSKOE FIELD

Dmitriy A. Martyushev¹,
martyushevd@inbox.ru

Alexander G. Mengaliev^{1,2},
mengaliev.alexandr@gmail.com

¹ Perm National Research Polytechnic University,
29, Komsomolskiy avenue, Perm, 614990, Russia.

² TPP Yamalneftegaz LLC LUKOIL-Western Siberia,
24, Matrosova street, Salekhard, 629008, Russia.

The relevance. Today, one of the urgent and the most important tasks in the oil industry is to increase the final oil recovery ratio. Much attention is now paid to the so-called hydrodynamic methods of increasing the oil recovery coefficient. One of the most simple, inexpensive, and frequently used hydrodynamic methods is cyclic flooding. A very important problem both from a scientific and a practical point of view is the possibility of using cyclic water flooding in complex reservoirs with low filtration and capacity properties, which most oil companies have begun to develop. At the moment, in order to evaluate the effectiveness of the technology, as well as to avoid undesirable consequences when applying it, hydrodynamic modeling is used. To solve this problem, an adapted geological and hydrodynamic model was used, taking into account the fracturing and the permeability anisotropy parameter of the Tournaisian-Famennian deposit of the Gagarinskoe field.

The main aim of the study is to assess the possibilities of implementing cyclic flooding based on a modified geological and hydrodynamic model that takes into account geomechanical effects.

Object: complex Tournaisian-Famennian carbonates deposit of the Gagarinskoe field.

Methods: the Roxar Tempest hydrodynamic simulator version 8.3.1.

Results. The performed modeling of cyclic waterflooding in certain areas of the Gagarinskoe field deposits showed a decrease in water production, accompanied by an increase in oil production. It should also be noted that the transition from stationary to cyclic waterflooding did not have a positive effect on all reacting production wells (increase in oil production), this is mainly due to the presence of vertical permeability (permeability anisotropy parameter). It is also confirmed that the omission of the permeability anisotropy parameter and the presence of natural fracturing in geological and hydrodynamic models leads to an overestimation of the parameter of cumulative oil production.

Key words:

Fracturing, vertical permeability, additional oil production, water cut, half cycle, filtration flow.

REFERENCES

1. Sharbatova I.N., Surguchev M.L. *Tsiklicheskie vozdeystvie na neodnorodnye neftyanye plasty* [Cyclic impact on heterogeneous oil reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 121 p.
2. Grachev S.I., Korotenko V.A., Kushakova N.P. Study on influence of two-phase filtration transformation on formation of zones of undeveloped oil reserves, *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 241, no. 1, pp. 68–82. In Rus.
3. Denislamov I.Z., Gimaltdinov I.K., Denislamova A.I., Maksutov Z.A. Technical solutions for evaluating water cut of oil wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 9, pp. 60–69. In Rus.
4. Almukhametova E.M. Expansion experience application technology unsteady waterflooding using technology change the direction of filtration flow on an example of deposit Northern Buzachi. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 2, pp. 115–121. In Rus.
5. Maksimov V.M. Generalized law of multiphase filtration and new effects of surface phenomena at two-phase flows in a porous medium. *Georesursy*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 86–91. In Rus.
6. Bozhenyuk N.N., Belkina V.A., Strekalov A.V. Geological model of the Vikulov deposits, taking into account the analysis of reservoir connectivity and data for horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 329, no. 4, pp. 30–44. In Rus.
7. Ermekov R.I., Korovin M.O., Merkulov V.P., Chernova O.S. The construction of an anisotropic hydrodynamic model and the study of the influence of permeability anisotropy on the example of modeling a block of a field. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 86–93. In Rus.
8. Martyushev D.A. Improving the geological and hydrodynamic model of a carbonate oil object by taking into account the permeability anisotropy parameter. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, no. 3, pp. 313–318. In Rus.
9. Yermekov R.I., Merkulov V.P., Chernova O.S., Korovin M.O. Features of permeability anisotropy accounting in the hydrodynamic model. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 243, no. 3, pp. 299–304. In Rus.
10. Martyushev D.A., Zaitsev R.A. The influence of petrophysical parameters of reefogenic carbonate reservoirs of oil deposits of the Tournais-Famennian deposits of the Upper Prikamye on the productivity of producing wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 11, pp. 77–85. In Rus.
11. Chumakov G.N. Estimation of the probability of the effective use of cyclic fluid injection into the reservoir at the Perm Territory deposits. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*, 2014, vol. 13, no. 13, pp. 49–58. In Rus.
12. Chebotareva I.Ya. Seismic emission tomography – a tool for studying the fracturing and fluid dynamics of the earth's crust. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 238–245. In Rus.
13. Sayfutdinov M.A., Khakimzyanov I.N., Petrov V.N., Sheshdirov R.I., Mironova L.M. Studies on the presence of a hydrodynamic connection between the terrigenous Bobrikovsky and carbonate Tournaisian objects on the basis of the geological and technological model of the field site. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 1, pp. 2–8. In Rus.

14. Gusev S.I. Petro-elastic modeling deliverables for the kharyaga permian carbonate deposits. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 62–68. In Rus.
15. Rastegaev R.A., Morozov V.V., Melnikov S.I., Idrisova S.A., Milchakov S.V. Conceptual geological modeling as the basis for the development of carbonate deposits on the example of a Middle East region deposit. *Georesursy*, 2018, vol. 20, no. 3, pp. 168–171. In Rus.
16. Khrantsova A.V., Pakhomov S.I., Natchuk N.Y., Musikhin A.D., Semenova N.G. Facies models of the achimov formation of east-Urengoi license as the basis for optimizing exploration and field development patterns. *Georesursy*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 55–61. In Rus.
17. Xiaolong Peng, Fanhua Zeng, Zhongwei Du, Hao Yang. Experimental study on pressure control strategies for improving waterflooding potentials in a heavy oil-methane system. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, vol. 149, pp. 126–137.
18. Artun E., Ertekin T., Watson R., Miller B. Designing cyclic pressure pulsing in naturally fractured reservoirs using an inverse looking recurrent neural network. *Computers and Geosciences*, 2012, vol. 38, Iss. 1, pp. 68–79.
19. Henderson N., Pena L. Simulating effects of the permeability anisotropy on formation of viscous fingers during waterflood operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 153, pp. 178–186.
20. Belonogov E.V., Korovin A.Y., Yakovlev A.A. Increase in intake capacity by dynamic operation of injection wells, *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 238, pp. 405–409. In Rus.
21. Kaijun Tong, Huiqing Liu, Yingchun Zhang, Jing Wang. Three-dimensional physical modeling of waterflooding in metamorphic fractured reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, vol. 42, Iss. 4, pp. 589–596.
22. Chenjun Huang, Geyun Liu, Kaibo Shi, Jinyin Yin, Jinrui Guo, Chongzhi Tao. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: a mechanism study. *Petroleum Research*, 2020, vol. 5, Iss. 2, pp. 124–130.
23. Huafeng Sun, Sandra Vega, Guo Tao. Analysis of heterogeneity and permeability anisotropy in carbonate rock samples using digital rock physics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 419–429.
24. Guerriero V., Mazzoli S., Iannace A., Vitale S., Strauss Ch. A permeability model for naturally fractured carbonate reservoir. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, vol. 40, pp. 115–134.
25. Chenjun Huang, Geyun Liu, Yongsheng Ma, Xinqi Zhou, Linyan Zhang, Jinyin Yin, Jinrui Guo. Hydrocarbon migration in fracture-cave systems of carbonate reservoirs under tectonic stresses: A modeling study, *Petroleum Research*, 2019, vol. 4, Iss. 4, pp. 354–364.
26. Yuling Tan, Zhejun Pan, Jishan Liu, Fubao Zhou, Asadul Haque. Experimental study of impact of anisotropy and heterogeneity on gas flow in coal. Part II: Permeability. *Fuel*, 2018, vol. 230, pp. 397–409.
27. Feng Ren, Guowei Ma, Guoyang Fu, Ke Zhang. Investigation of the permeability anisotropy of 2D fractured rock masses. *Engineering geology*, 2015, vol. 196, pp. 171–182.
28. Xinmin Song, Yong Li. Optimum development options and strategies for water injection development of carbonate reservoirs in the Middle East. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, vol. 45, Iss. 4, pp. 723–734.
29. Minory Sato, Takato Takemura, Manabu Takahashi. Development of the permeability anisotropy of submarine sedimentary rocks under true triaxial stresses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, vol. 108, pp. 118–127.
30. Longjun Dong, Qingchun Hu, Xiaojie Tong, Youfang Liu. Velocity-free MS/AE source location method for three-dimensional hole-containing structures. *Engineering*, 2020, vol. 6, Iss. 7, pp. 827–834.
31. Saeid Dowlati, Aliyar Javadi, Reinhard Miller, Alireza Bahramian. Characterization of reactive interfaces via coupled interfacial tension measurements and interphase mass transfer analysis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 609, 125711.
32. Zeeshan Tariq, Mohamed Mahmoud, Hasan Al-Youssef, Mohammad Rasheed Khan. Carbonate rocks resistivity determination using dual and triple porosity conductivity models. *Petroleum*, 2020, vol. 6, Iss. 1, pp. 35–42.
33. Mohammad Ali Ahmadi, Zhangxing Chen. Comparison of machine learning methods for estimating permeability and porosity of oil reservoirs via petro-physical logs. *Petroleum*, 2019, vol. 5, Iss. 3, pp. 271–284.
34. Mohamed A. Kassab, Ali Abbas, Ahmed Ghanima. Petrophysical evaluation of clastic Upper Safa Member using well logging and core data in the Obaiyed field in the Western Desert of Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2020, vol. 29, Iss. 2, pp. 141–153.
35. Ayad N.F. Edilbi, Kamal Kolo, Nechirvan R. Muhammed, Salman R. Yasin, Wrya J. Mamaseni, Rivan Akramd. Source rock evaluation of shale intervals of the Kurra Chine Formation, Kurdistan Region-Iraq: an organic geochemical and basin modeling approach. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 4, pp. 315–321.
36. Mohamed A. Kassab, Andreas Weller. Anisotropy of permeability, P-wave velocity and electrical resistivity of Upper Cretaceous carbonate samples from Tushka Area, Western Desert, Egypt. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 2, pp. 189–196.
37. Shedid A. Shedid. Vertical-horizontal permeability correlations using coring data. *Egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, Iss. 1, pp. 97–101.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Dmitriy A. Martyushev, Cand. Sc., associate professor, Perm National Research Polytechnic University.

Alexander G. Mengaliev, leading engineer of the Integrated Models Implementation and Maintenance Group, TPP Yamalneftegaz LLC LUKOIL-Western Siberia; postgraduate student, Perm National Research Polytechnic University.

УДК 543.053; 504.06

ПРАКТИКА ОТБОРА ПРОБ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Янченко Наталья Иванова,
fduescn@bk.ru

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью изучения химического состава снежного покрова для оценки качества воздуха и сопредельных сред в условиях изменения климата, что подтверждается устойчивым ростом научных публикаций по данной теме. В то же время практически отсутствуют современные публикации по методике отбора проб снежного покрова для аналитических целей.

Цель: исследовать практику отбора проб снежного покрова для аналитических определений на основе обзора научно-технической информации. Современные усовершенствованные методы отбора снежного покрова необходимы для получения наиболее достоверных данных о химическом составе снежного покрова, являются основой для оценки динамики качества воздуха и природоохранных мер, а также будут способствовать научному пониманию химических процессов, связанных со снегом в условиях изменения климата.

Объекты: нормативная и научно-техническая информация по методологии отбора проб снежного покрова для химического анализа; способы подготовки снежного покрова перед отбором проб; приборы, оборудование, средства, приспособления для отбора проб снежного покрова с целью определения плотности (физический показатель) и химического состава снежного покрова.

Методы: обзор научно-технической информации и систематизация сведений.

Результаты. Современная исследовательская практика отбора проб снежного покрова для химического анализа имеет свои особенности, отличные от рекомендуемых практик, разработанных в основном в 1990-х гг. Это обусловлено растущим количеством определяемых химических компонентов снежного покрова и требованиями достоверности отбора проб. Применяемые в настоящее время авторские практики отбора проб снежного покрова для химического состава снежного покрова имеют как общие этапы, так и отличия в зависимости от географической точки отбора и определяемого химического компонента. В настоящее время для отбора проб для исследования химического состава снежного покрова применяется большое разнообразие вспомогательных средств, устройств, приспособлений, не входящих в реестр измерительных средств для химического анализа снежного покрова, что вызывает необходимость совершенствования методик отбора проб снежного покрова и развития прикладного приборостроения в области химического снеговедения. Целесообразно разработать согласованные (типовые) методики отбора проб снежного покрова для химического анализа с учетом определенных географических регионов.

Ключевые слова:

Снежный покров, отбор проб, пробоотборник, химический компонент, методика.

Введение

Снег обеспечивает одну шестую часть населения планеты талой водой и практически все население планеты получает пользу от охлаждения Земли при сохранении теплового баланса, так как снег отражает солнечную энергию [1], также снег поддерживает процветающую в настоящее время индустрию зимнего отдыха на природе. М.М. Sturm пишет [1], что на сегодняшний день полная финансовая оценка значимости снега в нашей жизни (Канада) не проводилась, но расчеты здесь и в других местах показывают, что она составляет порядка триллионов долларов. В противовес этому значению текущие затраты на научные исследования тривиальны [1]. Исследования снега будут иметь все более важное значение для управления пресными водными ресурсами, смягчения последствий изменения климата, управления экономикой снежных районов [2, 3], для адаптации к новым климатическим условиям и оценки рисков (таких как лавины и наводнения), для учета удовлетворения новых потребностей, связанных со сведениями о снеге [4]. Появятся новые потребности в исследовании параметров снега, например, при современном освоении Арктики и Антарктики. Недостаток знаний о снеге считается самым большим пробелом в современных представлениях о глобальном водном балансе [5].

Важной составляющей исследования снежного покрова является изучение его химического состава для оценки качества воздуха и поверхностных вод, состояния сопредельных сред или для палеоклиматических исследований. В настоящее время исследования химического состава снежного покрова (ХССП) также необходимы в связи с тем, что характер распределения загрязняющих веществ существенно изменится с изменением климата, в частности с ростом температуры и изменением количества осадков в отдельных регионах [6].

Но наблюдения за химическим составом снежного покрова на месте немногочисленны по сравнению с измерениями физических свойств снега, которые могут быть дистанционными или автоматизированными [1]. Обзор информации позволяет сделать вывод, что зарубежными учеными более активно исследуется наличие черного углерода, компонентов биоты, химических веществ во льдах и снегах Арктики, Антарктики, горных массивах, городских территориях. В РФ большинство публикаций посвящены химическому составу снежного покрова в населенных пунктах или в ближних районах атмосферного техногенного влияния, что связано прежде всего с доступностью объекта, так как отбор снега – это всегда финан-

сирование экспедиционных исследований разного масштаба.

Обзор данных об исследовании химического состава снежного покрова в РФ свидетельствует, что наблюдается устойчивый рост публикаций. Если провести запрос в e-laibray на слова «химический состав снежного покрова» (аннотации, статьи в журналах, ключевые слова, полный текст статей), то будет найдено 288 публикаций из 30621756 в 2010 г., 353 – 2013 г., 424 – 2016 г., 378 – 2017 г., 407 публикаций из 30621756 в 2018 г. (Дата обращения 15.09.2019). На территории России актуальность исследования СП не вызывает сомнений. По данным [7. С. 9] продолжительностью устойчивого снежного покрова (Т дни) с указанием коэффициента вариации (c_T , %) составляет для: «Мурманское УГКС 193 дней (3 c_T , %), Северо-Западное УГКС 150 дней (12 c_T , %), Верхне-Волжское УГКС 156 дней (5 c_T , %), Уральское УГКС 164 дня (5 c_T , %), Западно-Сибирское УГКС 175 дней (5 c_T , %), Иркутское УГКС 196 дней (5 c_T , %)». В то же время публикаций, посвященных методологии и практике отбора проб снежного покрова для химического анализа макро и микро-количеств веществ и элементов, практически нет, несмотря на доступность многих аналитических исследований.

Известно, что отбор проб – это одна из важных стадий проведения анализа. Достоверность исследования химического состава снежного покрова зависит не только от современного оборудования, квалифицированных специалистов, но и от соблюдения методологии отбора проб. Результаты химического анализа, полученные на основе недостоверного, некорректного пробоотбора, могут привести к неверной интерпретации результатов анализа и выводам.

В.Н. Василенко пишет [7], что систематические наблюдения за ХССП были организованы в начале 1980-х гг. на базе существовавшей в то время снегомерной сети. Исследователи В.А. Ветров, В.В. Кузовкин, Д.А. Манзон [8] указывают, что создание системы мониторинга ХССП позволило впервые в мировой практике получить детальную картину загрязнения снежного покрова на обширных территориях и её изменений во времени. «Сеть мониторинга ХССП на территории РФ в 2016 г. включала 528 пунктов наблюдений (ПН), из них на Европейской территории РФ – 268, на азиатской территории РФ – 260. В настоящее время в пробах снежного покрова, отбираемых ежегодно перед активным снеготаянием, определяются кислотность (рН) и концентрации макроионов – SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , NH_4^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . По результатам наблюдений строятся карты-схемы принятых в современный период показателей «р» мониторинга ХССП: рН (кислотность) снежного покрова и интенсивность атмосферных выпадений серы IS и азота IN ($\text{кг/км}^2 \cdot \text{мес}$) в каждом ПН наблюдений в зимний период» [8. С. 93].

В настоящее время исследователи различных организаций определяют в основном следующие химические компоненты снежного покрова: водорастворимые и нерастворимые соединения (черный углерод, органический углерод, атмосферные аэрозоли); мак-

ро- и микропримеси веществ; макро- и микроэлементный состав; водорастворимые органические соединения; некоторые полициклические ароматические углеводороды; изотопы; минерализацию; рН и другие.

Краткие хронологические сведения о нормативной и научно-технической литературе в РФ, содержание методологии отбора проб снежного покрова для химического анализа (с 1970-х гг.)

В 1971 г. была издана книга И.Д. Копанева «Методы изучения снежного покрова» [9]. В 1982 г. в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов опубликованы методические указания по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды [10] и загрязнения химическими элементами территорий городов [11] с указанием роли снежного покрова.

В 1985 г. в Госкомгидромете утверждены «Временные методические указания для производства отбора и обработки проб снежного покрова в городах и их окрестностях на комплекс загрязняющих веществ». Предлагается организация представительной сети отбора проб в городе [12].

В 1985 г. издана книга В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридмана «Мониторинг загрязнения снежного покрова» [7]. Как указано в работе, «картину пространственного распределения загрязняющих веществ в снежном покрове удобно характеризовать тремя картами: распределения концентрации загрязняющих веществ (мг/л); количества загрязняющих веществ, выпавших за время от образования снежного покрова до момента накопления максимума влагозапаса в снеге – поверхностной плотности (т/км^2); интенсивности выпадения загрязняющих веществ ($\text{кг/км}^2 \cdot \text{сут}$)» [7. С. 59]. Поэтому для интерпретации результатов важно знать не только концентрацию загрязняющего вещества, но и учитывать количество снеговой воды (проба снежного покрова), влагозапас, дату отбора пробы, дату установления снежного покрова и площадь отбора пробы снежного покрова.

В 1989 г. Госуомгидрометом и Главным Государственным санитарным врачом СССР утверждено «Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89», которое содержит раздел 5. Наблюдения за загрязнением снежного покрова. В РД 52.04.186-89 указано, что для отбора проб снега используют стандартный снегомер-плотномер, при пробоотборе каждый керн вырезается на полную глубину снегового покрова, что перед ссыпанием снега в полиэтиленовое ведро или пакет тщательно очищается нижний конец снегомера и снежного керна от грунта и растительных включений [13].

В 1990 г. утверждены «Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве», которые предназначены для работников организаций, занимающихся охраной окружающей среды в городах. Рекомендации подготовлены в Институте минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов Мингео СССР и

АН СССР (ИМГРЭ) [14]. В п. 2.5 указано «Пробы снежного покрова отбираются на всю мощность из шурфов или снегоотборниками, обязательно фиксируется площадь шурфа и время снегостава. Размеры шурфа измеряются по длине и ширине для расчета площади, на которую проектируются выпадения из атмосферы» [14. С. 4].

В 1990 г. издана коллективная монография «Геохимия окружающей среды» Ю.Е. Саета, Б.А. Ревича, Е.П. Янина и других авторов [15]. В 1994 г. утверждены РД 52.44.2-94 «Методические указания. Охрана природы. Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой» [16].

В 2010 г. утверждены приказом Министерства экологии и природных ресурсов Республики Татарстан «Методические рекомендации. Оценка аэротехногенного загрязнения природных сред химическими элементами по результатам мониторинга снежного покрова» [17].

В 2016 г. опубликованы рекомендации 52.18.851-2016. «Основные средства измерений гидрометеорологического назначения, применяемые на государственной наблюдательной сети» [18], в которых указано применение снегомера весового ВС-43 (номер в Госреестре средств измерений 22529-02) и снегомера составного М-78 для измерения высоты, плотности и водного эквивалента снежного покрова.

Практика измерения плотности снежного покрова

Эти практики измерения рассмотрены в связи с тем, что с учетом целей исследования возможно их применение для отбора проб для ХССП. Известный исследователь снежного покрова И.Д. Копанев указывает, что главная физическая (ныне геофизическая) обсерватория занималась вопросами организации снегомерной сети, разработки методики наблюдений и обработки материалов. Здесь в 1893 г. была составлена первая инструкция для наблюдения над снежным покровом и метелями, а в 1903 г. была подготовлена инструкция для наблюдений над плотностью снежного покрова [9].

Известно устройство для отбора проб снега, по которому определяют физические характеристики снежного покрова (плотность), – снегомер ВС-43 [13, 18, 19], состоящее из металлического цилиндра и весов, механически соединенных подвесом. По данным [18] снегомер весовой ВС-43 имеет номер 22529-02 в Госреестре средств измерений и предназначен для измерений высоты, плотности, водного эквивалента снежного покрова. В.В. Козин, Э.А. Кузнецова [20] пишут, что «на каждом участке измерялась (в трех точках) плотность снега с помощью весового снегомера...». Далее авторы В.В. Козин, Э.А. Кузнецова [20] делают ссылку на Рекомендации 1989 и 1990 гг. [9, 13].

Усовершенствованный снегомер весовой ВС-43М зарегистрирован в реестре государственных средств измерений [21]. Снегомер весовой ВС-43М применяют при проведении снегомерных съёмок на гидрометеорологических станциях и постах и в различных отраслях народного хозяйства. Известно, что снего-

мер предназначен для измерения высоты и массы вырезаемого столбика пробы снега. Плотность снега рассчитывается из полученного веса и объема пробы. Приемная площадь цилиндра равна $50 \pm 0,4 \text{ см}^2$. Товар сертифицирован. Номер в государственном реестре 57925-14.

Авторский коллектив Г.Г. Гулякина предлагает «Способ отбора проб снега и устройство для его осуществления» [22] и «Устройство для отбора проб снега» [23]. Изобретения относятся к метеорологическим, гидрологическим, гидрохимическим и экологическим исследованиям и могут быть использованы для изучения плотности, запасов и химического состава снега и исследования снеговых свалок [23]. Известен пробоотборник снегомерный [24] А.П. Сергеева, А.Г. Бувича, Д.Б. Берга. При описании своего изобретения авторы указывают, что «основным недостатком при использовании снегомера ВС-43 для отбора проб снега является недостаточная точность отбора пробы. Причинами этого являются конструкция цилиндра и его материал, в частности: в результате нагрева металлического цилиндра солнцем или при транспортировке в салоне автомобиля его температура часто оказывается выше 0°C , что при относительно высоких значениях его теплопроводности и теплоемкости ... приводит к налипанию снега на поверхность цилиндра (изнутри и снаружи), особенно в температуре воздуха около 0°C , а именно такие условия наблюдаются при снегомерной съемке максимального влагозапаса и загрязнения снежного покрова... налипание снега на поверхность цилиндра снаружи искажает вес пробы, а налипание внутри – и вес, и объем пробы; цилиндр с малым внутренним диаметром (около 80 мм)... при отборе пробы сминает снег, а не прорезает его, что приводит к искажению веса и объема пробы, а также завышению плотности снега...» [24. С. 9, 10]. Авторы предлагают снегомер с пластиковым цилиндром увеличенного диаметра и возможностью уплотнения пробы непосредственно в цилиндре, что повышает точность определения физических и химических характеристик снежного покрова и сокращает время отбора каждой пробы.

В работе исследователя И.Д. Копанева [10] указано, что для измерения высоты и плотности снежного покрова используется составная дюралюминиевая трубка, состоящая из нескольких секций. Секция имеет длину 76 см, внутренний диаметр 3,77 см. Нижняя часть трубки имеет пилообразную резьбу. Труба может состоять из отдельных секций, общая длина – 608 см. Чтобы снизить потери снега из трубки, при извлечении ее из снега рекомендуется с помощью резьбы захватывать некоторое количество почвы, которая служит пробкой. «Рекомендации 52.18.851-2016» [18] также указывают на «Снегомер составной М-78». В описании [22, 23] указано, что устройство предназначено для отбора проб снега (снегомер составной М-78) и содержит систему металлических труб (до четырех с суммарной длиной до 3,5 м), соединенных при помощи байонетного затвора, а также содержит рейку с измерительной шкалой,

указателем, уравнивающим грузом, серьгой и призмой с подвесом, механической связью» [22, 23].

Известно руководство по отбору проб снежного покрова департамента сельского хозяйства США (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Water and Climate) [25]. Целью данного руководства является содействие эффективной и точной снежной съемке и установление единых процедур отбора проб. Это учебное и справочное руководство предназначено для геодезистов, которые используют оборудование для отбора проб для измерения накопления снега. В нем объясняются процедуры отбора проб и регистрации, необходимые для точных прогнозов водоснабжения страны. Показано применение составного пробоотборника.

D. Dixon, S. Boon в своей работе [26] рассматривают три конструкции пробоотборников, предназначенных для измерения водного эквивалента, с целью оценки точности измерений. Три пробоотборника сравнивали (A: SnowHydro, B: MSC, C: Standard Federal) в условиях мелкого, сильно расслоенного снега. Полученные результаты сравнивали уже с результатами, полученными методикой отбора проб методом шурфа. Исследователи N.J. Kinar, J.W. Romeroy [27] выполнили обзор методов измерения и соответствующих устройств, используемых для определения физических свойств сезонного снежного покрова, с расстояний, близких к поверхности земли. Указано, что снежная труба, которая используется большинством исследователей снежного покрова, изготовлена из металла или прозрачного пластика с зубчатым режущим концом. Прозрачная пластиковая труба позволяет исследователю визуально наблюдать образец снега после того, как он был извлечен, хотя металлические пробоотборники для снега часто имеют прорези, чтобы можно было увидеть образец снега. Образец извлекается путем проталкивания трубки через снежный покров пока зубчатый режущий конец не достигнет поверхности земли. Ручки на верхней части трубки позволяют поворачивать пробоотборник так, чтобы зубчатый режущий конец извлекал пробку из почвы. Для сравнения, некоторые снежные трубки, использовавшиеся в прошлом, были просто контейнерами, которые применялись для отбора проб снега [27]. Использование снежных трубок было впервые популяризировано J.E. Church в книге «Snow surveying: its principles and possibilities» [28]. На сайте Western Snow Conference [29] указано о применении различных пробоотборников, которые имеют разную площадь отбора, в зависимости от типа и глубины снега.

R. Pirazzini [30] пишет об обзоре N.J. Kinar [27], что их историческая перспектива иллюстрирует развитие и современное состояние отрасли с упором на практики, применяемые в Северной Америке и Канаде, которые, однако, не полностью соответствуют нынешним практикам, которые используют Европейские институты. Она также пишет о результатах анкетирования по вопросу исследования снежного покрова. Измерения снега на месте, проводимые европей-

скими институтами для оперативных исследовательских и энергетических бизнес-приложений, были обследованы в рамках действия Европейского сотрудничества в области науки и техники (COST) ES1404, названного «Европейская сеть для согласованного мониторинга снега для преимущества сценариев изменения климата, гидрологии и численного прогноза погоды». Авторы представили результаты этого опроса, на который ответили 125 участников из 99 операционных и исследовательских учреждений, принадлежащих к 38 европейским странам [30]. 93 % респондентов измеряют макрофизические параметры снега, такие как наличие снега, глубина снега (HS – height snow), эквивалент снежной воды (SWE – snow water equivalent) и плотность снега. Параметры, характеризующие микроструктурные свойства снега (такие как размер и форма снежного зерна и удельная площадь поверхности), электромагнитные свойства снега (такие как альбедо, яркостная температура и обратное рассеяние) и состав снега (такие как примеси и изотопы) измеряются 41, 26 и 13 % респондентов, соответственно, в основном для исследовательских целей.

Средства, устройства, приспособления, способы и приемы отбора проб снежного покрова для химического анализа

Выполнение среза снежного покрова и отбор проб с помощью пластин. Известен снегоотборник М.П. Тентюкова. В описании указано, что «изобретение относится к области защиты окружающей среды и предназначено для послойного опробования снежной толщи с регулируемым шагом отбора проб при выявлении аэротехногенного загрязнения поверхности снега в результате осаждения сульфатов из приземного слоя воздуха при образовании поверхностного инея» [31. С. 62].

Отбор проб пластиковым цилиндрическим пробоотборником. Авторы [32] указывают, «что снегоотборник представлял собой пластиковую трубу диаметром 14,5 см. Отбор снегового керна проводился из ненарушенной стенки траншеи, выкапываемой до поверхности почвы. КERN отбирался последовательно сверху вниз частями. Высота отдельных частей керна могла варьировать от 15 до 50 см и более в зависимости от плотности снегового покрова» [32. С. 62, 63].

Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева и другие указывают, что «снегомерная геохимическая съемка проведена в начале марта 2010 г. при максимальной высоте снежного покрова. Смешанные пробы из 10 отдельных проб отбирали с шагом 500–700 м пластиковой трубой диаметром 5 см в 51 точке на территории округа и в 5 фоновых точках в 50 км на запад от Москвы в районе г. Звенигород» [33. С. 15]. Также применение подобного устройства с указанием на химическую инертность пробоотборника описано в работе Т.И. Прожориной, Е.В. Беспаловой, С.А. Куролап, П.М. Виноградова [34]. Авторы пишут, что «репрезентативные пробы "лежалого" снега отбирались по всей толще снежного покрова, за исключением нижних 2–3 см (во избежание загрязнения частицами

почвы). Отбор проб проводился пластиковой трубкой площадью сечения $78,5 \text{ см}^2$ и длиной 30 см. В месте отбора пробы трубу врезали на всю толщину снежного покрова до поверхности земли. После чего трубку из снега вынимали, поддерживая снизу пластмассовой лопаткой. Нижнюю часть трубки тщательно очищали от частиц грунта» [34. С. 29]. Исследователи Н.В. Салтан, Е.П. Шлапак, В.К. Жиров, О.Б. Гонтарь, Е.А. Святковская также указывают, что «смешанные пробы снега отбирались с помощью пластиковой трубы длиной 1,15 м и диаметром 10 см. Одна проба могла содержать от 4 до 15 кернов в зависимости от плотности и мощности снежного покрова. Снег отбирался на всю глубину за исключением нижнего слоя в 3–5 см, чтобы избежать загрязнения проб снега с подстилающей растительностью и почвой» [35. С. 329]. Рекомендации [17. С. 6] указывают, что «снегоотборник представляет собой пластиковую трубу (длина в пределах 800–1000 мм) с определенным диаметром (в пределах 80–100 мм), снабженную дополнительно для предотвращения потерь снега в процессе отбора уплотняющим снежную массу поршнем. Нижний конец снегоотборника фальцуется для облегчения вхождения его в снежный покров, а по внешней поверхности наносится градуировка в см для определения высоты снежного покрова». В рекомендации [17] применяют пробоотборник А.Р. Валетдинова [36].

Отбор снежного покрова с использованием шурфа и керна бурения. С. Кутузов, М. Шахгеданова, К. Вайт, М. Вудейдж, В. Михаленко, И. Лаврентьев, Г. Носенко указывают, что при выполнении совместного проекта Института географии РАН (г. Москва) и Университета г. Рэдинг по определению влияния поверхностного загрязнения на таяние льда на Кавказе была разработана специальная методика анализа горизонтов загрязнения в снежных шурфах [37]. Авторы пишут, что было проведено неглубокое кернавое бурение на западном плато Эльбруса и отобраны образцы снега и фирна [37]. Исследователи применили перчатки для исключения вторичного загрязнения пробы. В работе [38] указано, что в течение зимнего сезона в 2014 г. проводился отбор свежеснежного снега и интегральных проб из снежных шурфов в окрестностях р. Баренцбург и пос. Лонгйир. Фрагмент методики: «Перед тем как выкопать снежный шурф, производилось тщательное исследование местности, для того, чтобы исключить действие посторонних факторов, таких как: ветряной надув у подножий склона и переотложение снега в открытых частях горных долин... После изготовления снежного шурфа, его строго вертикальная стенка зачищалась с помощью пластмассовой лопатки или совка, предотвращающих попадание загрязнений от железной лопаты. Далее в шурфе выделялись горизонты, которые описывались. Для выделения равномерной пробы из шурфа использовался бур (аналогичный используется для бурения льда). Выделенный объем снега из шурфа отбирался в пластмассовые герметичные контейнеры» [38. С. 107].

Отбор снежного покрова с использованием шурфа и пробы в виде прямоугольного параллелепипеда. Как

указано в работе В.Н. Макарова, при отборе проб в Якутии «в стенке шурфа вырезался блок в виде прямоугольного параллелепипеда на всю высоту снега от дневной поверхности до земли или льда. Ширина блока фиксировалась, объем снега составлял величину около 3 дм^3 ... На территории Якутии снег отбирался как путем точечного опробования – для региональной характеристики химического состава снежного покрова, так и площадным методом на локальных участках» [39. С. 22].

Отбор снежного покрова рамкой. Авторами [40] определен химический состав снежного покрова в заповедниках Прибайкалья. Указано, что из снега на всю его высоту вырезалась колонка, измерялась ее площадь и высота, пластиковой лопаткой снег переносился в полиэтиленовые мешки для транспортировки в лабораторию. На фотографии с названием «Отбор проб снежного покрова на Байкальской природной территории. По результатам анализов производится расчет накопления загрязняющих веществ на подстилающей поверхности», приведенной на сайте Лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Лимнологического института [41] показано, как выполняют отбор проб. Можно предположить, что применяют специальную прямоугольную рамку. А.В. Украинцев также указывает на то, что «снег отбирался на всю его мощность за исключением непосредственно соприкасающегося с почвой слоем. Участок для сбора снега выделялся... рамкой в форме квадрата со сторонами 0,5 м» [42. С. 140].

Отбор снежного покрова с использованием шурфа и послойный отбор проб подробно описан исследователями J.C. Gallet, M.P. Bjorkman, C. Larose и др. Они представили доклад «Protocols and recommendations for the measurement of snow physical properties, and sampling of snow for black carbon, water isotopes, major ions and microorganisms» («Протоколы и рекомендации по измерению физических свойств снега и отбору проб снега на содержание черного углерода, изотопов воды, основных ионов и микроорганизмов») [43].

Отбор проб снежного покрова шпателем. Исследователи [44, 45], проводящие отбор проб в полевых условиях, позаботились о том, чтобы предотвратить загрязнение проб. Для этого использовался шпатель из нержавеющей стали, а образцы помещались в пластиковые пакеты, в свою очередь упакованные в пакеты Whirlpack. Пенополистирольные кулеры использовались для транспортировки в лабораторию [44, 45].

Как показывает краткий обзор научно-технической информации [3–6, 31–56], некоторые методики отбора проб для химического анализа являются авторскими, не стандартизированными, что определяется целями анализа, состоянием снежного покрова и географическим местом. Можно отметить, что применяемые методики основаны на классических рекомендациях [7, 10–16].

Также можно отметить, что вид (способ) подготовки снежного покрова выбирается в зависимости от его физических характеристик, места и времени отбора проб, подстилающей поверхности (лед, грунт, склон), целей анализа. Возможно, что исследователи

делают срез снежного покрова, шурф для отбора слоев или для отбора керна пробы снега в виде столбика цилиндра или прямоугольного параллелепипеда, в основании которого прямоугольник.

Также можно перечислить некоторые этапы выполнения отбора проб непосредственно на месте. Эти этапы не указаны в методических рекомендациях 1970–1990-х гг. [7, 10–16], но которые из них используют современные исследователи. При выполнении современного отбора проб также целесообразно:

- выполнить регистрацию GPS-координат (включая высоту местности);
- применять специальную одежду, перчатки, маски (хранится в запечатанном виде до отбора проб) при выполнении анализа на микрокомпоненты;
- применить пробоотборник и дополнительные средства из инертного материала, а также пластиковые мешки, полипропиленовые емкости для хранения и транспортировки проб;
- сделать панорамный снимок места отбора пробы.

Обзор научно-технической информации, приведенной в данной работе, показывает необходимость обсуждения практики отбора проб с целью повышения достоверности.

Так, в декабре 2017 г. состоялся первый научно-исследовательский полевой семинар в ИРНТУ (г. Иркутск) «Теоретические и практические аспекты исследования снежного покрова: Южный Байкал», на котором была сделана попытка рассмотрения некоторых вопросов отбора проб для химического анализа

[56]. В программе международных конференций [56] предусмотрена тематика по методологии исследования снежного покрова.

Заключение

1. Современная практика отбора проб снежного покрова для химического анализа имеет свои особенности, отличные от практик, разработанных в основном в 1990-х гг. Это обусловлено растущим количеством определяемых химических компонентов снежного покрова и требованиями повышения достоверности отбора проб.
2. Современные авторские исследовательские практики отбора проб снежного покрова для химического состава снежного покрова имеют общие этапы и отличия в зависимости от географической точки отбора и определяемого химического компонента.
3. В настоящее время для отбора проб для исследования химического состава снежного покрова применяется большое разнообразие вспомогательных средств, устройств, приспособлений, не входящих в реестр измерительных средств для химического анализа снежного покрова, что вызывает необходимость развития прикладного приборостроения в области химического снеговедения.
4. Для гармонизации измерений целесообразно разработать согласованные методики отбора проб снежного покрова для химического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sturm M., Goldstein M., Parr C. Water and life from snow: a trillion dollar science question // *Water Resources Research*. – 2017. – V. 53. – Iss. 5. – P. 3534–3544.
2. Burakowski E., Magnusson M. Climate impacts on the winter tourism economy in the United States. – New York, NY, USA: Natural Resources Defense Council, 2012. – 36 p. URL: file:///C:/Users/ASUS/Downloads/NRDC_POW_climate-impacts-winter-tourism-reportcopy.pdf (дата обращения: 03.12.2019).
3. Gastineau G., Garcia-Serrano J., Frankignoul C. The influence of autumnal Eurasian snow cover on climate and its link with Arctic Sea ice cover // *Journal Climate*. – 2017. – V. 30. – P. 7599–7619.
4. Changing Arctic snow cover: a review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts / S. Bokhorst, S.H. Pedersen, L. Brucker, O. Anisimov, J.W. Bjerke, R.D. Brown, D. Ehrich, R.L. Essery, A. Heilig, S. Ingvander, C. Johansson, M. Johansson, I.S. Jónsdóttir, I.N. Niila, K. Luojus, M. Heather, D.D. McLennan, G.N. Rosqvist, A. Sato, N. Savela, M. Schneebeli, S.A. Sokratov, S. Terzago, D. Vikhamar-Schuler, S. Williamson, Y. Qiu, T.V. Callaghan // *Ambio*. – 2016. – V. 45. – P. 516–537.
5. Witze A. Snow sensors seek best way to track the white stuff // *Nature*. – 2016. – V. 532. – P. 17.
6. Assessment of future climate change impacts on nonpoint source pollution in snowmelt period for a cold area using SWAT / YuWang, Jianmin Bian, Yongsheng Zhao, Jie Tang, Zhuo Jia. URL: <http://www.nature.com/scientificreports> (дата обращения: 26.05.2019).
7. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 181 с.
8. Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. Государственная сеть наблюдений за химическим составом снежного покрова в РФ: итоги и проблемы // *Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и Байкальского региона: Материалы Первой Междуна. научно-практ. конференции*. – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. – С. 93–97.
9. Копанев И.Д. Методы изучения снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 226 с.
10. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 66 с.
11. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.И. Сагит, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.
12. Временные методические указания для производства отбора и обработки проб снежного покрова в городах и их окрестностях на комплекс загрязняющих веществ. – М.: Госкомгидромет СССР, 1985. – 16 с.
13. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.04.186_89.pdf (дата обращения 03.12.2019).
14. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 16 с. URL: <http://www.alppp.ru/law/zdravooohranenie-fizicheskaja-kultura-i-sport-turizm/zdravooohranenie/59/metodicheskie-rekomendacii-po-ocenke-stepeni-zagraznenija-atmosfernogo-vozduha-naseleennyh.pdf> (дата обращения 03.12.2019).
15. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Сагит, Б.А. Ревич, Е.П. Янин, Р.С. Смирнова, И.Л. Барашкевич, Т.Л. Онищенко, Л.Н. Павлова, Н.Я. Трефилова, А.И. Ачкасов, С.Ш. Саркисян. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с.
16. РД 52.44.2-94 Руководящий документ. Методические указания. Охрана природы. Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой. URL: http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.44.2_94.pdf (дата обращения 03.12.2019).
17. Методические рекомендации. Оценка аэротехногенного загрязнения природных сред химическими элементами по ре-

- зультатам мониторинга снежного покрова. Утв. приказом Министра экологии и природных ресурсов Республики Татарстан от 26.02.2010 г. № 131. – Казань, 2010. – 16 с. URL: <https://studylib.ru/doc/3892257/4.5.-opredelenie-postuplenij-himicheskikh-e-lementov> (дата обращения: 10.11.2019).
18. Р 52.18.851-2016 О введении в действие рекомендаций. Основные средства измерений гидрометеорологического назначения, применяемые на государственной наблюдательной сети. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2016. – 80 с.
19. Снегомер ВС-43. Руководство по эксплуатации. URL: http://pp66.ru/uploadedFiles/images/gydrometeo/Snegomer_VS-43_rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf (дата обращения: 10.11.2019).
20. Козин В.В., Козин В.В., Кузнецова Э.А. Физико-географические факторы пространственно-временной изменчивости снежного покрова нефтегазопромыслового региона. – Нижневартовск: Нижневартовский государственный университет, 2015. – 151 с.
21. ВС-43М Снегомер весовой № 57925-14, сертификат № 56178. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/370865> (дата обращения: 03.12.2019).
22. Способ отбора проб снега и устройство для его осуществления: пат. Рос. Федерация. № 2047121, G01N1/20; заявл. 14.01.1993; опубл. 27.10.1995. <http://www.findpatent.ru/patent/204/2047121.html> (дата обращения: 15.11.2020).
23. Устройство для отбора проб снега: пат. Рос. Федерация. RU2247351C2. URL: <https://findpatent.ru/patent/224/2247351.html> (дата обращения 01.09.2019).
24. Пробоотборник снегомерный: пат. Рос. Федерация, № RU 80587 U1; заявл. 29.07.2008. опубл. 10.02.2009.
25. Руководство по отбору образцов снежного покрова. Процедуры отбора проб. URL: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/factpub/ah169/ah169p05.htm> (дата обращения: 17.04.2019).
26. Dixon D., Boon S. Comparison of the SnowHydro snow sampler with existing snowtube designs in southwestern Alberta, Canada // *Proceedings of LXVIII eastern snow conference*. – Montreal, Quebec: McGill University, 2011. – P. 207–224.
27. Kinar N.J., Pomeroy J.W. Measurement of the physical properties of the snowpack // *Reviews of Geophysics*. – 2015. – V. 53. – Iss. 2. – P. 481–544.
28. Church J.E. Snow surveying: its principles and possibilities // *Geographical Review*. – 1933. – V. 23. – P. 529–563.
29. Metrication of manual snow sampling equipment by western snow conference metrication committee / P.E. Farnes, N.R. Peterson, B.E. Goodison, R.P. Richards // *Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference*. – Reno, Nevada, 1982. – P. 120–132. URL: <https://westernsnowconference.org/node/918> (дата обращения 11.12.2019).
30. European in-situ snow measurements: practices and purposes / R. Pirazzini, L. Leppänen, G. Picard, J.I. Lopez-Moreno, C. Marty, G. Macelloni, A. Kontu, A. Lerber, C.M. Tanis, M. Schneebeli, P. Rosnay, A.N. Arslan // *Sensors (Basel)*. – 2018. – V. 18 (7). URL: <https://doi.org/10.3390/s18072016> (дата обращения 11.12.2019).
31. Тентюков М.П. Особенности послыной изменчивости интегральных физико-химических параметров снежного покрова в среднетаежной зоне на северо-востоке европейской равнины // *Криосфера Земли*. – 2018. – Т. XXII. – № 2. – С. 61–69.
32. Маслобоев В.А., Горбачева Т.Т., Евдокимова Г.А., Казаков Л.А., Переверзев В.Н., Похилько А.А., Раткин Н.Е. Экологическое состояние наземных и водных экосистем в районе Кольской АЭС. – Апатиты: Изд-во Кольский научный центр РАН, 2010. – 227 с.
33. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
34. Аэротехногенный мониторинг состояния городской среды по загрязнению снежного покрова (на примере города Воронеж) / Т.И. Прожорина, Е.В. Беспалова, С.А. Куролап, П.М. Виноградов // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11: Естественные науки*. – 2014. – № 3. – С. 28–34.
35. Химический состав снега на урбанизированных территориях в условиях Крайнего Севера / Н.В. Салтан, Е.П. Шлапак, В.К. Жиров, О.Б. Гонтарь, Е.А. Святковская // *Вестник МГТУ*. – 2015. – Т. 18. – № 2. – С. 328–334.
36. Снегоотборник: пат. Рос. Федерация. RU 53436 U1; Номер заявки: 2005123013/22 заявл. 19.07.2005; опубл. 10.05.2006.
37. Влияние поверхностного загрязнения на ледники Кавказа. URL: <http://paleoglaciology.org/ru/regions/Caucasus/DIOGENES/> (дата обращения: 28.08.2019).
38. Петрига А.А., Горюнова Н.В. Состав снега в импактных районах Арктики на примере поселков залива Ис-фьорд архипелага Шпицберген // *Вестник науки и образования*. – 2016. – № 2. – С. 106–110.
39. Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И. Геохимия снежного покрова Якутии. – Якутск: Институт мерзлотоведения СО РАН СССР, 1990. – 152 с.
40. Химический состав снежного покрова в заповедниках Прибайкалья / О.Г. Нецветева, Т.В. Ходжер, Л.П. Голобокова, Н.А. Кобелева, Т.В. Погодаева // *География и природные ресурсы*. – 2004. – № 1. – С. 66–72.
41. Лаборатория гидрохимии и химии атмосферы. URL: <http://www.lin.irk.ru/hydrochem/workdays> (дата обращения 01.09.2019).
42. Украинцев А.В. Нерастворимые дисперсные частицы в снежном покрове в районах лесных пожаров // *Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: климат и экология северных территорий и Байкальского региона: Материалы Первой Международной научно-практической конференции*. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – С. 139–142.
43. Protocols and recommendations for the measurement of snow physical properties, and sampling of snow for black carbon, water isotopes, major ions and microorganisms / J.-Ch. Gallet, M.P. Björkman, C. Larose, B. Luks, T. Martma, C. Zdanowicz. URL: <https://brage.npolar.no/npolar-xmlui/browse?type=author&value=Gallet%2C+Jean-Charles> (дата обращения 14.12.2019).
44. Elemental and mineralogical composition of the Western Andean snow (18°S–41°S) / J.A. Alfonso, R.R. Cordero, P.M. Rowe, P.M. Rowe, S. Neshyba, G. Casassa, J. Carrasco, S. MacDonell, F. Lambert, J. Jaime Pizarro, F. Fernandoy, S. Feron, A. Damiani, P. Llanillo, E. Sepulveda, J. Jorquera, B. Garcia, J.M. Carrera, P. Oyola, C.-M. Kang // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-39312-0 URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-44516-5> (дата обращения 03.12.2019).
45. Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes / P.M. Rowe, R.R. Cordero, S.G. Warren, E. Stewart, S.J. Doherty, A. Pankow, M. Schrempf, G. Casassa, J. Carrasco, J. Pizarro, S. MacDonell, A. Damiani, F. Lambert, R. Rondanelli, N. Huneus, F. Fernandoy, S. Neshyba // *Scientific Reports*. – 2019. – V. 9. – Article number 40084008.
46. Hair geochemical composition of children from Vilnius kindergartens as an indicator of environmental conditions / R. Taraskevicius, R. Zinkute, L. Gedminiene, Z. Stankevicius // *Environ Geochem Health*. – 2018. – V. 40. – Iss. 5. – P. 1817–1840.
47. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China / Song Cui, Zihan Song, Leiming Zhang, Zulin Zhang, Rupert Hough, Qiang Fu, Lihui An, Zhenxing Shen, Yi-Fan Li, Dong Liu, Shang Gao // *Atmospheric Environment*. – 2019. – V. 215. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.116915
48. Signals of pollution revealed by trace elements in recent snow from mountain glaciers at the Qinghai-Tibetan plateau / Yuefang Li, Zhen Li, G. Cozzi, C. Turetta, C. Barbante, Ju Huang, Longfei Xiong // *Chemosphere*. – 2018. – V. 200. – P. 523–531.
49. Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S. Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia) // *Chemosphere*. – 2018. – V. 202. – P. 446–459.
50. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // *Environmental Technology*. – 2018. – V. 39. – Iss. 18. – P. 2288–2303.
51. Converting snow depth to snow water equivalent using climatological variables / D.F. Hill, E.A. Burakowski, R.L., Crumley J. Keon, J.M. Hu, A.A. Arendt, J.K. Wikstrom, G.J. Wolken // *The Cryosphere*. – 2019. – V. 13. – P. 1767–1784.
52. Chemistry of snow cover and acidic snowfall during a season with a high level of air pollution on the Hans Glacier / A.P. Nawrot, K. Migala, B. Luks, P., Pakysys P. Glowacki // *Spitsbergen Polar Science*. – 2016. – V. 10. – Iss. 3. – P. 249–261.

53. Seasonal variations in the major chemical species of snow at the South East Dome in Greenland / I. Oyabu, S. Matoba, T. Yamasaki, M. Kadota, Y. Iizuka // *Polar Science*. – 2016. – V. 10. – Iss. 1. – P. 36–42.
54. Dynamics of ionic species in Svalbard annual snow: the effects of rain event and melting / E. Barbaro, C. Varin, X. Pedeli, J.M. Christille, T. Kirchgeorg, F. Giardi, D. Cappelletti, C. Turetta, A. Gambaro, A. Bernagozzi, J.C. Gallet, M.P. Björkman, A. Spolaor // *The Cryosphere Discuss.* 2019. URL: <https://www.the-cryosphere-discuss.net/tc-2019-124/> (дата обращения 17.12.2019).
55. Specifying the light-absorbing properties of aerosol particles in fresh snow samples, collected at the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS), Zugspitze / M. Schnaiter, C. Linke, I. Ibrahim, A. Kiselev, F. Waitz, T. Leisner, S. Norra, T. Rehm // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2019. – V. 19. – P. 10829–10844.
56. Янченко Н.И., Букин Ю.С., Баранов А.Н. Первый научно-исследовательский полевой семинар «Теоретические и практические аспекты исследования снежного покрова: Южный Байкал» // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: технология, климат и экология: Материалы Второй Байкальской Междунар. научно-практ. конф. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2018. – С. 247–253.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Янченко Н.И., доктор технических наук, профессор Института высоких технологий Иркутского национально-го исследовательского технического университета.

PRACTICE OF SNOW COVER SAMPLING FOR CHEMICAL ANALYSIS

Natalia I. lanchenko,
fduen@bk.ru

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to study snow cover chemical composition to assess air quality and adjacent environments under climate change, which is confirmed by the steady growth of scientific publications on this topic. At the same time, there are practically no modern publications on the methodology for sampling snow cover for analytical purposes.

The main aim: to study snow cover sampling practices for analytical definitions based on a review of scientific and technical information. Modern improved snow sampling techniques are needed to obtain the most reliable data on chemical composition of snow cover, provide a basis for assessing air quality dynamics and environmental protection outcomes, and will contribute to the scientific understanding of the chemical processes associated with snow under climate change.

Objects: information on regulatory and scientific and technical literature in the Russian Federation on the methodology for sampling snow cover for chemical analysis; methods for preparing snow cover before sampling; instruments, equipment, means, devices for sampling snow cover in order to determine the density (physical indicator) and chemical composition of the snow cover.

Methods: review of scientific and technical information and data systematization.

Result. The current practice of sampling snow cover for chemical analysis has its own characteristics that differ from practices developed mainly in the 1990s. This is due to the growing number of determined chemical components of the snow cover and the requirements for the reliability of sampling. Modern, original practices of snow cover sampling for the chemical composition of the snow cover have common stages and differences depending on the geographical point of sampling and the determined chemical component. At present, a wide variety of auxiliary tools and devices not included in the register of measuring instruments for the chemical analysis of snow cover are used for sampling to study the chemical composition of snow cover, which necessitates the development of applied instrumentation in the field of chemical snow science. It is advisable to develop harmonized snow cover sampling techniques for chemical analysis.

Key words:

Snow cover, sampling, sampler, chemical component, method.

REFERENCES

1. Sturm M., Goldstein M., Parr C. Water and life from snow: a trillion dollar science question. *Water Resources Research*, 2017, vol. 53, Iss. 5, pp. 3534–3544.
2. Burakowski E., Magnusson M. *Climate impacts on the winter tourism economy in the United States*. New York, NY, USA, Natural Resources Defense Council, 2012. 36 p. Available at: https://protectourwinters.org/climate_report/report.pdf (accessed 2 December 2019).
3. Gastineau G., Garcia-Serrano J., Frankignoul C. The influence of autumnal Eurasian snow cover on climate and its link with Arctic Sea ice cover. *Journal Climate*, 2017, vol. 30, pp. 7599–7619.
4. Bokhorst S., Pedersen S.H., Brucker L., Anisimov O., Bjerke J.W., Brown R.D., Ehrich D., Essery R.L., Heilig A., Ingvald S., Johansson C., Johansson M., Jónsdóttir I.S., Niila I.N., Luojus K., Heather M., McLennan D.D., Rosqvist G.N., Sato A., Savela N., Schneebeli M., Sokratov S.A., Terzago S., Vikhamar-Schuler D., Williamson S., Qiu Y., Callaghan T.V. Changing Arctic snow cover: a review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts. *Ambio*, 2016, vol. 45, pp. 516–537.
5. Witze A. Snow sensors seek best way to track the white stuff. *Nature*, 2016, vol. 532, p. 17.
6. Yu Wang, Jianmin Bian, Yongsheng Zhao, Jie Tang, Zhuo Jia. *Assessment of future climate change impacts on nonpoint source pollution in snowmelt period for a cold area using SWAT 10.1038/s41598-018-20818-y*. Available at: <http://www.nature.com/scientificreports> (accessed 26 May 2019).
7. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 181 p.
8. Vetrov V.A., Kuzovkin V.V., Manzov D.A. Gosudarstvennaya set nablyudeniya za khimicheskimi sostavom snezhnogo pokrova v RF: itogi i problemy [State network of observations of the chemical composition of snow cover in the Russian Federation: results and problems]. *Snezhnyy pokrov, atmosferynye osadki, aerizoly: klimat i ekologiya severnykh territoriy i Baykalskogo regiona. Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Snow cover, precipitation, aerosols: climate and ecology of the Northern territories and the Baikal region: proceedings of the I International scientific and practical conference]. Irkutsk, INRTU Publ., 2017. pp. 93–97.
9. Kopanov I.D. *Metody izucheniya snezhnogo pokrova* [Methods of studying the snow cover]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971. 226 p.
10. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke istochnikov zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Methodological recommendations for geochemical assessment of environmental pollution sources]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 66 p.
11. Revich B.A., Saet Yu.I., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 111 p.
12. *Vremennyye metodicheskie ukazaniya dlya proizvodstva otbora i obrabotki prob snegovogo pokrova v gorodakh i ikh okrestnostyakh na kompleks zagryaznyayushchikh veshchestv* [Temporary guidelines for the production selection and processing of samples of snow cover in cities and their surroundings on the complex of pollutants]. Moscow, Goskomgidromet Publ., 1985. 16 p. Available at: http://ipk.meteorf.ru/images/stories/literatura/rd/52.04.186_89.pdf (accessed 3 December 2019).
13. *RD 52.04.186-89 Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery* [Manual on air pollution control]. Part 2, p. 5.1.2. Moscow, Goskomgidromet Publ., 1991. 65 p.
14. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozdukh naseleennykh punktov metallami po ikh soderzhaniiyu v snezhnom pokrove i pochve* [Methodological recommendations for assessing the degree of air pollution of settlements metals on their content in the snow cover and soil]. Moscow, IMGRE Publ., 1990. 5 p. Available at: <http://www.alppp.ru/law/zdravooohranenie--fizicheskaja-kultura-i-sport--turizm/zdravooohranenie/59/metodicheskie-rekomendacii-po-ocenke-stepeni-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduha-naseleennykh.pdf> (accessed 3 December 2019).
15. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Barashkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya.,

- Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
16. RD 52.44.2-94 *Rukovodnyashchiy dokument. Metodicheskie ukazaniya. Okhrana prirody. Kompleksnoe obsledovanie zagryazneniya prirodnikh sred promyshlennyykh rayonov s intensivnoy antropogennoy nagruzkoj* [Guidance document. Methodical instructions. Nature protection. Comprehensive survey of pollution of natural environments of industrial areas with intensive anthropogenic load]. Moscow, IGKE Publ., 1988. Available at: http://ipk.meteor.ru/images/stories/literatura/rd/52.44.2_94.pdf (accessed 3 December 2019).
17. *Metodicheskie rekomendatsii. Otsenka aerotekhnogenogo zagryazneniya prirodnikh sred khimicheskimi elementami po rezul'tatam monitoringa snezhnogo pokrova* [Methodical recommendation. Assessment of aerotechnogenic pollution of natural environments by chemical elements based on the results of snow cover monitoring]. Available at: <https://studylib.ru/doc/3892257/4.5.-opredelenie-postuplenij-himicheskikh-elementov> (accessed 10 November 2019).
18. R 52.18.851-2016 *O vvedenii v deystvie rekomendatsy. Osnovnyye sredstva izmereniy gidrometeorologicheskogo naznacheniya, primenyaemye na gosudarstvennoy nablyudatel'noy seti* [On implementation of the recommendations. Main hydrometeorological measuring instruments used on the state observation network]. Moscow, Rosgidromet, 2016. 80 p.
19. *Snegomer VS-43. Instruksiya po ekspluatatsii* [Snow gauge VS-43. Operation manual]. http://pp66.ru/uploadedFiles/images/gidrometeo/Snegomer_VS-43_rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf (accessed 11 December 2019).
20. Kozin V.V., Kozin V.V., Kuznetsova E.A. *Fiziko-geograficheskie faktory prostranstvenno-vremennoy izmenchivosti snezhnogo pokrova neftegazopromyslovogo regiona* [Physical and geographical factors of spatial and temporal variability of snow cover of oil and gas field region]. Nizhnevartovsk, Nizhnevartovsk State University Publ., 2015. 151 p.
21. *VS-43M Snegomer vesovoy* [Snow meter weight]. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/370865> (accessed 3 December 2019).
22. Gulyakin G.G. *Sposob otbora prob snega i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of sampling snow and device for its implementation]. Patent RF, no. 2047121, 1995.
23. RU2247351C2 *Ustroystvo dlya otbora prob snega* [A device for snow sampling]. Available at: <https://findpatent.ru/patent/224/2247351.html> (accessed 1 September 2019).
24. Sergeev A.P., Buevich A.G., Berg D.B. *Probotoornik snegomerny* [Snow measuring sampler]. Patent RF, no. RU 80587 U1, 2009.
25. *Rukovodstvo po otboru obraztsov snezhnogo pokrova. Protseduy otbora prob* [Manual sampling of the snow cover. Sampling procedure]. Available at: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/factpub/ah169/ah169p05.htm> (accessed 17 April 2019).
26. Dixon D., Boon S. Comparison of the SnowHydro snow sampler with existing snowtube designs in southwestern Alberta, Canada. *Proceedings of LXVIII eastern snow conference*. Montreal, Quebec, McGill University Publ., 2011. pp. 207–224.
27. Kinar N.J., Pomeroy J.W. Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, 2015, vol. 53, Iss. 2, pp. 481–544.
28. Church J.E. Snow surveying: its principles and possibilities. *Geographical Review*, 1933, vol. 23, pp. 529–563.
29. Farnes P.E., Peterson N.R., Goodison B.E., Richards R.P. Metrication of manual snow sampling equipment by western snow conference metrication committee. *Proceedings of the 50th Annual Western Snow Conference*. Reno, Nevada, 1982. pp. 120–132. Available at: <https://westernsnowconference.org/node/918> (accessed 11 December 2019).
30. Pirazzini R., Leppänen L., Picard G., Lopez-Moreno J.I., Marty C., Macelloni G., Kontu A., Lerber A., Tanis C.M., Schneebeli M., Rosnay P., Arslan A.N. European in-situ snow measurements: practices and purposes. *Sensors*, 2018, vol. 18. Available at: <https://doi.org/10.3390/s18072016> (accessed 11 December 2019).
31. Tentyukov M.P. Features of layer-by-layer variability of integrated physical and chemical parameters of snow cover in the middle taiga zone in the North-East of the European plain. *Kriosfera Zemli*, 2018, vol. XXII, no. 2, pp. 61–69. In Rus.
32. Masloboev V.A., Gorbacheva T.T., Evdokimova G.A. *Ekologicheskoe sostoyanie nazemnykh i vodnykh ekosistem v rayone Kolskoy AES* [Ecological state of terrestrial and aquatic ecosystems in the Kola NPP area]. Apatity, Kola science centre RAN Publ., 2010. 227 p.
33. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Snow cover geochemistry in eastern region of Moscow. *Bulletin of Moscow University. Series 5: Geography*, 2012, no. 4, pp. 14–24. In Rus.
34. Prozhorina T.I., Bepalova E.V., Kurolap S.A., Vinogradov P.M. Aerotekhnogeny monitoring sostoyaniya gorodskoy sredy po zagryazneniyu snezhnogo pokrova (na primere goroda Voronezh) [Aerotekhnogenic monitoring of city environment state by snow cover contamination (on the example of Voronezh)]. *Bulletin of Volgograd state University. Series 11: Natural Sciences*, 2014, no. 3, pp. 28–34.
35. Saltan N.V., Shlapak E.P., Zhirov V.K., Gontar O.B., Svyatkovskaya E.A. Snow chemical composition in urban territories in the Arctic. *Bulletin of the Moscow State technical University*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 328–334. In Rus.
36. Valetdinov A.R., Valetdinov R.K., Gorshkova A.T. *Snegootbornik* [Snow collector]. Patent RF, no. 53436, 2006.
37. *Vliyaniye poverkhnostnogo zagryazneniya na ledniki Kavkaza* [Influence of surface pollution on the glaciers of the Caucasus]. Available at: <http://paleogeology.org.ru/regions/Caucasus/DIOGENES/> (accessed 28 August 2019).
38. Petruga A.A., Goryunova N.V. Snow composition in the impact regions of the Arctic on the example of the Is-fjord Bay settlements of the Svalbard archipelago. *Bulletin of Science and education*, 2016, no. 2, pp. 106–110. In Rus.
39. Makarov V.N., Fedoseev N.F., Fedoseeva V.I. *Geokhimiya snezhnogo pokrova Yakutii* [Geochemistry of the snow cover of Yakutia]. Yakutsk, Institute of permafrost SB RAS USSR Publ., 1990. 152 p.
40. Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V., Golobokova L.P., Kobeleva N.A., Pogodaeva T.V. Khimicheskii sostav snezhnogo pokrova v zapovednikakh Pribaykalya [Snow cover chemical composition in Baikal region reservations]. *Geography and natural resources*, 2004, no. 1, pp. 66–72.
41. *Laboratoriya gidrokhimii i khimii atmosfery* [Laboratory of hydrochemistry and atmospheric chemistry]. Available at: <http://www.lin.irk.ru/hydrochem/workdays> (accessed 1 September 2019).
42. Ukraintsev A.V. Nerasvorimyye dispersnyye chastitsy v snezhnom pokrove v rayonakh lesnykh pozharishch [Insoluble dispersed particles in snow cover in forest fires]. *Snezhnyy pokrov, atmosferynye osadki, aeroli: klimat i ekologiya severnykh territoriy i Baykalskogo regiona. Materialy I mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Snow cover, precipitation, aerosols: climate and ecology of the Northern territories and the Baikal region: proceedings of the I international scientific and practical conference]. Irkutsk, Irkutsk national research technical University Publ., 2017. pp. 139–142.
43. Gallet J.-Ch., Björkman M.P., Larose C., Luks B., Martma T., Zdanowicz C. *Protocols and recommendations for the measurement of snow physical properties, and sampling of snow for black carbon, water isotopes, major ions and microorganisms*. Available at: <https://brage.npolar.no/npolar-xmlui/browse?type=author&value=Gallet%2C+Jean-Charles> (accessed 1 September 2019).
44. Alfonso J.A., Cordero R.R., Rowe P.M., Rowe P.M., Neshyba S., Casassa G., Carrasco J., MacDonell S., Lambert F., Jaime Pizarro J., Fernandez F., Feron S., Damiani A., Llanillo P., Sepulveda E., Jorquera J., Garcia B., Carrera J.M., Oyola P., Kang C.-M. Elemental and Mineralogical Composition of the Western Andean Snow (18°S–41°S). *Scientific Reports*, 2019, vol. 9. DOI: 10.1038/s41598-019-39312-0 Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-44516-5> (accessed 11 December 2019).
45. Rowe P.M., Cordero R.R., Warren S.G. Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes. *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, Article number 40084008.
46. Taraskevicius R., Zinkute R., Gedminiene L., Stankevicius Z. Hair geochemical composition of children from Vilnius kindergartens as an indicator of environmental conditions. *Environ Geochem Health*, 2018, vol. 40, Iss. 5, pp. 1817–1840.
47. Song Cui, Zihan Song, Leiming Zhang, Zulin Zhang, Rupert Hough, Qiang Fu, Lihui An, Zhenxing Shene, Yi-Fan Lif, Dong

- Liu, Shang Gao. Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China. *Atmospheric Environment*, 2019, vol. 215. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.116915
48. Yuefang Li, Zhen Li, Cozzi G., Turetta C., Barbante C., Ju Huang, Longfei Xiong. Signals of pollution revealed by trace elements in recent snow from mountain glaciers at the Qinghai Tibetan plateau. *Chemosphere*, 2018, vol. 200, pp. 523–531.
 49. Gustaytis M.A., Myagkaya I.N., Chumbaev A.S. Hg in snow cover and snowmelt waters in high-sulfide tailing regions (Ursk tailing dump site, Kemerovo region, Russia). *Chemosphere*, 2018, vol. 202, pp. 446–459.
 50. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology*, 2018, vol. 39, Iss. 18, pp. 2288–2303.
 51. Hill D.F., Burakowski E.A., Crumley R.L., Keon J., Hu J.M., Arndt A.A., Wikstrom J.K., Wolken G.J. Converting snow depth to snow water equivalent using climatological variables. *The Cryosphere*, 2019, vol. 13, pp. 1767–1784.
 52. Nawrot A.P., Migala K., Luks B., Pakszys P., Glowacki P. Chemistry of snow cover and acidic snowfall during a season with a high level of air pollution on the Hans Glacier. *Spitsbergen Polar Science*, 2016, vol. 10, Iss. 3, pp. 249–261.
 53. Oyabu I., Matoba S., Yamasaki T., Kadota M., Iizuka Y. Seasonal variations in the major chemical species of snow at the South East Dome. *Greenland Polar Science*, 2016, vol. 10, pp. 36–42.
 54. Barbaro E., Varin C., Pedeli X., Christille J. M., Kirchgeorg T., Giardi F., Cappelletti D., Turetta C., Gambaro A., Bernagozzi A., Gallet J.C., Björkman M.P., Spolaor A. Dynamics of ionic species in Svalbard annual snow: the effects of rain event and melting. *The Cryosphere Discuss*, 2019. Available at: <https://www.the-cryosphere-discuss.net/tc-2019-124/> (accessed 17 December 2019).
 55. Schnaiter M., Linke C., Ibrahim I., Kiselev A., Waitz F., Leisner T., Norra S., Rehm T. Specifying the light-absorbing properties of aerosol particles in fresh snow samples, collected at the Environmental Research Station Schneefernerhaus (UFS), Zugspitze. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, vol. 19, pp. 10829–10844.
 56. Ianchenko N.I., Bukin Yu.S., Baranov A.N. Pervy nauchno-issledovatel'skiy polevoy seminar «Teoreticheskie i prakticheskie aspekty issledovaniya snezhnogo pokrova: Yuzhnyy Baykal» [The first research field seminar «Theoretical and practical aspects of the study of the snow cover of southern Baikal»]. *Snezhnyy pokrov, atmosferynye osadki, aerizoli: tekhnologiya, klimat i ekologiya. Materialy II Baykalskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Snow cover, precipitation, aerosols: technology, climate and ecology: proceedings of the II Baikal international scientific and practical conference]. Irkutsk, Irkutsk national research technical University Publ., 2018. pp. 247–253.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Natalia I. Ianchenko, Dr. Sc., professor, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 519.81: 629.359

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР РЕЖИМОВ РАБОТЫ АГРЕГАТОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ НЕФТИ ПРИ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Оразбаев Батыр Бидайбекович¹,
batyr_o@mail.ru

Оразбаева Кульман Нахановна²,
kulman_o@mail.ru

Утенова Балбупе Есенжановна³,
balbupе_u_e@mail.ru

Шагаева Айнура Багитжановна³,
ai_b_sh@mail.ru

Касимова Ботакоз Рахметуллаевна¹,
Kassimovabotagoz@gmail.com

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
Казахстан, 010008, г. Нур-Султан, ул. Пушкина, 11.

² Казахский университет экономики, финансов и международной торговли,
Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Жубанова, 7.

³ Атырауский университет нефти и газа,
Казахстан, 060006, г. Атырау, ул. Баймуханова, 45.

Актуальность исследования обосновывается тем, что при управлении процессами транспортировки нефти по магистральным трубопроводам возникает необходимость определения и выбора оптимальных режимов работы агрегатов нефтепровода с учетом нечеткости некоторой части исходной информации. В этой связи формулировка и решение задач многокритериального выбора эффективных режимов работы технологических объектов нефтепроводной системы, которые часто описываются в нечеткой информационной среде на основе математического аппарата нечетких множеств, является актуальной научно-практической задачей.

Цель: сформулировать постановку задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов нефтепровода в нечеткой информационной среде и, модифицируя различные принципы оптимальности, разработать эвристические методы их решения. Разработанные методы должны быть реализованы с привлечением лица, принимающего решения, в процессе принятия решений. Реализовать предложенный нечеткий подход к решению задачи выбора оптимального режима работы на примере станции подогрева нефти магистрального нефтепровода Узень–Самара в пункте Атырау.

Объекты: технологические агрегаты магистрального нефтепровода, которые характеризуются многокритериальностью и нечеткостью некоторых ограничений.

Методы: методы теорий нечетких множеств, методы многокритериального выбора, эвристические методы, методы нечеткого математического программирования.

Результаты. Сформулированы постановки задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов магистральных нефтепроводов в условиях нечеткости некоторой части исходной информации, и разработаны эвристические методы их решения. Предложенные эвристические методы многокритериального выбора в нечеткой среде разработаны на основе применения опыта и знаний лица, принимающего решения и модификации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой среде. Для обеспечения возможности выбора лицом, принимающим решения, более удобного метода решения задачи выбора режима в зависимости от наличия и доступности исходной информации, предлагается набор постановки задачи выбора путем применения различных принципов оптимальности (компромиссных схем принятия решений) и их комбинации. Предложенный подход реализован при постановке и решении задачи многокритериального выбора режимов работы нефтепровода с целью оптимального управления процессом перекачки нефти по магистральному нефтепроводу Узень–Атырау–Самара (участок Кульсары–Атырау) с привлечением человека, т. е. применяя нечеткую информацию в виде его опыта, знаний и интуиций. Полученные результаты подтвердили эффективность предложенного подхода к решению поставленных задач.

Ключевые слова:

Многокритериальный выбор, транспортировка нефти, магистральные нефтепроводы, нечеткая информация, лицо, принимающее решение, эвристический метод.

Введение

Магистральные трубопроводы являются сложной разветвленной технологической системой большой протяженности. Магистральные трубопроводы, по сравнению с другими видами транспортировки жид-

ких и газообразных георесурсов, являются более эффективным и экологически безопасным видом транспортировки нефти и газа [1]. Магистральные нефтепроводы являются сложной транспортной системой, оснащенной станциями перекачки нефти (мощными

насосами), станциями подогрева нефти (при перекачке вязких нефтей) и линейными участками (собственно трубопровод), а также средствами связи, автоматике, телемеханике и противопожарными устройствами [2, 3]. Структурная схема типовой магистральной нефтепроводной системы и основные объекты исследования данной работы представлены на рис. 1.

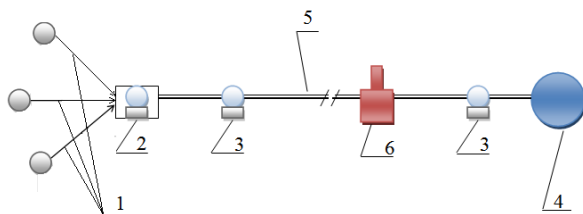


Рис. 1. Основные элементы и объекты нефтепровода, для которых необходимо выбрать режимы работы: 1 – подводные нефтепроводы, которые связывают место добычи нефти с головными сооружениями нефтепровода; 2 – головная нефтеперекачивающая станция; 3 – промежуточные нефтеперекачивающие станции; 4 – конечные пункты, принимающие продукты из магистрального нефтепровода; 5 – линейная часть нефтепровода (трубопровод); 6 – станций подогрева нефти (трубчатые печи) для перекачки вязких нефтей

Fig. 1. The main elements and objects of the oil pipeline for which it is necessary to choose operating modes: 1 – supply pipelines that connect the oil production place with the main structures of the oil pipeline; 2 – head oil pumping station; 3 – intermediate oil pumping stations; 4 – end points receiving products from the main oil pipeline; 5 – linear part of the pipeline (pipeline); 6 – oil heating stations (tube furnaces) for pumping viscous oils

При транспортировке нефти по магистральным трубопроводам часто возникают задачи выбора оптимальных режимов работы основных объектов трубопроводной системы [4, 5]. В качестве основных объектов магистрального нефтепровода в данной работе рассматриваются: станции перекачки нефти (насосные агрегаты); станции подогрева нефти (трубчатые печи) и линейная часть трубопровода. Таким образом, при управлении процессами транспортировки нефти по магистральным нефтепроводам задачи поиска и выбора эффективных режимов работы агрегатов нефтепроводной системы являются актуальными. При этом выбираемые режимы работы объектов нефтепровода должны обеспечивать экстремальные значения критериев управления, например, максимальную производительность, максимальный объем перекачки, минимальное воздействие на окружающую среду и др.

Принятие оптимальных решений по выбору эффективных режимов работы объекта – это процесс, выполняемый с участием лица, принимающего решения (ЛПР). В процессе выбора решения оцениваются альтернативы, т. е. возможные варианты решений, и производится выбор наилучшего из них по заданным

критериям [4, 6]. Оценка и выбор наилучшего решения в производственных условиях, в т. ч. в нашей задаче, производится в условиях многокритериальности, т. е. по вектору критериев экономического, экологического, технологического характера. Задача усложняется тем, что эти экономические и экологические критерии могут быть противоречивыми, а также описаны нечетко. В этих условиях задача многокритериального выбора, т. е. когда исходное множество альтернатив Ω_A известно, но неизвестен принцип оптимальности opt , сводится к задаче исследования предпочтений ЛПР и построению на этой основе адекватной модели выбора наилучшей по заданным критериям альтернативы [5–9].

Важность решения таких актуальных для науки и практики задач и интерес к понятию процессов анализа и сопоставления ЛПР многокритериальных альтернатив, выполняемых при выборе решения, привела к появлению ряда работ по многокритериальному выбору и по принятию решения [4, 5, 10–13]. Но следует отметить, что в проанализированных работах недостаточно исследованы и решены проблемы многокритериального выбора режимов работы сложных технологических систем в условиях противоречивых, плохо формализуемых и нечетко описываемых критериев и альтернатив. В этой связи основной целью данной работы является исследование и решение некоторых проблем задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации по определению оптимальных режимов работы технологических объектов на примере основных технологических агрегатов нефтепроводной системы. Для достижения поставленной цели и решения задач используются методы принятия решений [7–10], методы многокритериальной оценки альтернатив [12, 13], методы теорий нечетких множеств [14–16], компромиссные схемы принятия решений [4–6].

Задача многокритериального выбора эффективных режимов работы агрегатов магистрального нефтепровода

Сначала формализуем задачи многокритериального выбора на примере задачи выбора режимов работы нефтепроводной системы. Для этого введем следующие обозначения: $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$ – вектор экономико-экологических критериев, оценивающих качество работы нефтепроводной системы. Например, некоторые частные (локальные) критерии $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$ описывают экономические показатели, такие как объем перекачки, прибыль и т. д., а другие $f_{k+1}(\mathbf{x}), f_{k+2}(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$ – экологические показатели нефтеперекачивающего производства.

$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор (множество) входных и управляемых параметров нефтепровода (объем, реологические свойства нефти, расходы реагентов, температура, давление агрегатов и т. д. Значения частных критериев зависят от $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ [3, 17–20]. На практике значения элементов этого вектора, т. е. режимных параметров, определяются в области Ω , т. е.:

$$x_j \in \Omega, \quad j = \overline{1, n}; \quad \Omega = [x_j^{\min}, x_j^{\max}],$$

здесь x_j^{\min}, x_j^{\max} – заданные технологическим регламентом минимальные и максимальные значения параметра $x_j, j=\overline{1, n}$.

Тогда задача многокритериального выбора эффективного режима работы управляемого объекта сводится к поиску и определению такого значения вектора $\mathbf{x}^*=(x_1^*, \dots, x_n^*)$, который обеспечивает оптимальное значение $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*)=f_1(\mathbf{x}^*), \dots, f_m(\mathbf{x}^*)$. Причем должны быть выполнены все условия заданных ограничений $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$, а также при выборе решения должны быть учтены предпочтения лица, принимающего решения.

Отметим, что функции $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$, описывающие ограничения на ресурсы, могут быть заданы технологическими регламентами и экологическими нормативами. Все или часть из них могут быть нечеткими, т. е. $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq (\leq, =) b_q, q=\overline{1, L}$ либо $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{K, L}$, $\varphi_q(\mathbf{x}) \leq b_q, q=\overline{1, K}$. Также и заданное число $b_q, q=\overline{1, L}$ или некоторые из них могут быть нечеткими, т. е. \tilde{b}_q .

Теперь запишем математическую постановку формализованной задачи определения оптимальных режимов работы агрегатов нефтепровода при наличии нечетких ограничений. Для этого сначала приведем задачу к удобному для применения методов теории нечетких множеств виду, введя следующие обозначения:

- $\mu_0(\mathbf{x})=(\mu_0^1(\mathbf{x}), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}))$ – нормализованный вектор частных критериев $f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$. Как уже отмечено, $\mu_0(\mathbf{x})=(\mu_0^1(\mathbf{x}), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}))$ позволяет оценить качество режимов работы агрегатов нефтепровода;
- $\mu_q(\mathbf{x}), q=\overline{1, L}$ – функции принадлежности, оценивающие степень выполнения нечетких ограничений $\varphi_q(\mathbf{x}) \geq b_q, q=\overline{1, L}$. Данные функции могут быть построены с участием ЛПР, специалистов-экспертов [19–21];
- $\gamma=(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ и $\beta=(\beta_1, \dots, \beta_L)$ – вектор важности критериев $(\gamma_1, \dots, \gamma_m)$ и ограничения $(\beta_1, \dots, \beta_L)$ (весовые коэффициенты). Эти весовые коэффициенты для частных критериев и ограничений считаются известными или могут быть заданы ЛПР.

Тогда в общем виде математическую постановку задачи выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода в условиях многокритериальности можно записать в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^i(\mathbf{x}), i=\overline{1, m}, \\ X = \{\mathbf{x} : \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}), q=\overline{1, L}\}.$$

Путем модификации и адаптации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой информационной среде можно получить различные постановки задач многокритериального выбора режимов магистрального нефтепровода. Для эффективного решения полученной задачи с нечеткими ограничениями можно разработать и применить эвристические методы, основанные на привлечении ЛПР, специалистов-экспертов. Преимущество такого подхода к решению задачи многокритериального выбора в нечеткой среде в том, что в нем учитываются опыт, знания и интуиция человека, обеспечивается гибкость при

учете предпочтения ЛПР в процессе выбора решения [5, 12, 21, 22].

Разработка эвристических методов решения задач многокритериального выбора. Результаты исследования

Путем модификации различных принципов оптимальности при нечеткости можно получить конкретные задачи многокритериального выбора в нечеткой среде и разработать эвристические методы их решения. Разработанные эвристические методы решения задач выбора основаны на привлечение ЛПР при выборе решения. В них используются опыт, знания и интуиция ЛПР, формализованные как нечеткая информация. Например, на основе идеи принципа относительной уступки (ОУ) и принципа равенства (ПР) постановку задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации запишем в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0(\mathbf{x}), \quad \mu_0(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \gamma_i \log \mu_0^i(\mathbf{x}), \quad (1)$$

$$X = \{\mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \arg(\beta_1 \mu_1^i(\mathbf{x}) = \beta_2 \mu_2^i(\mathbf{x}) = \dots = \beta_L \mu_L^i(\mathbf{x}))\}. \quad (2)$$

В полученной постановке \wedge – знак логического «и», требующий, чтобы все условия, которые связаны через \wedge , выполнялись; $\gamma_i, i=\overline{1, m}$ и $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_L$ – весовые коэффициенты, отражающие взаимную важность критериев и ограничений.

В постановке задачи (1), (2) допускается, что значения весовых коэффициентов $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ и β_1, \dots, β_L задаются или определяются экспертом с учетом уступки со стороны ЛПР и обеспечивают одинаковые важности нечетких ограничений. При этом решение задачи (1), (2) зависит от значения весовых коэффициентов, т. е. при различных значениях этих коэффициентов получается семейство решений, а выбор наилучшего решения $\mathbf{x}^*(\gamma, \beta)$ осуществляет ЛПР на основе своего предпочтения, т. е. используя эвристические методы [23, 24].

Для решения задачи многокритериального выбора (1), (2) предлагаем следующий эвристический метод на основе принципов относительной уступки и равенства (ОУ+ПР), основные пункты которых приведены ниже:

Эвристический алгоритм на основе принципов ОУ+ПР:

1. С привлечением специалистов-экспертов и ЛПР определяются значения весовых коэффициентов частных критериев $\gamma_1, \dots, \gamma_m$ с учетом $\sum_{i=1}^m \gamma_i = 1$ и $\gamma_i \geq 0, i=\overline{1, m}$, а также вводятся значения весовых коэффициентов ограничений β_1, \dots, β_L , которые обеспечивают $\sum_{q=1}^L \beta_q = 1, \forall q, \beta_q \geq 0, q=\overline{1, L}$ и равенство $\beta_1 \mu_1^i(\mathbf{x}) = \beta_2 \mu_2^i(\mathbf{x}) = \dots = \beta_L \mu_L^i(\mathbf{x})$.
2. Если критерии $\mu_0^i(\mathbf{x})$ и весовые коэффициенты $\gamma_i, i=\overline{1, m}$ являются нечеткими, то необходимо выбрать терм-множество и построить соответствующие функции принадлежности.

3. Определяются количество шагов p_q для каждой координаты $q=1, L$.
4. Для изменения координат весовых векторов $\beta=(\beta_1, \dots, \beta_L)$ рассчитываются $h_q = \frac{1}{p_q}$, $q=1, L$ – длина шагов.
5. Меняя координаты на отрезке $[0, 1]$ на величину h_q , определяются векторы $\beta^1, \beta^2, \dots, \beta^N$, $N=(p_1+1)(p_2+1)\dots(p_L+1)$.
6. Для нечетких ограничений строятся функции принадлежности $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1, L$, оценивающей их степень выполнения.
7. С применением принципа ОУ решается задача максимизации: $\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0(\mathbf{x})$, $\mu_0(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \gamma_i \log \mu_0^i(\mathbf{x})$ и определяются текущие решения $\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)$, обеспечивающие максимальные значения критериев $\mu_0^1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ и функции принадлежности $\mu_1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$.
8. Вычисленные значения $\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)$, $\mu_0^1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ и $\mu_1(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}(\gamma_i, \beta_q))$ предъявляются ЛПР. Если текущие результаты удовлетворяют его, то он переходит к следующему пункту 9, иначе ЛПР с целью улучшения решения вводит новые значения γ_i , $i=1, m$ и/или β_q , $q=1, L$ и осуществляется переход обратно к пункту 2 алгоритма.
9. Выводятся результаты выбора ЛПР эффективных решений, т. е. значения режимных параметров $\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)$, обеспечивающие желаемые значения локальных критериев $\mu_0^1(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_0^m(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q))$ при условии выполнения нечетких ограничений $\mu_1(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q)), \dots, \mu_L(\mathbf{x}^*(\gamma_i, \beta_q))$.

На практике могут возникать различные производственные ситуаций, например, меняются характеристики перекачиваемого сырья, корректируются производственные планы, меняются характеристики агрегатов и приборов и т. д. Соответственно критерии выбора решений, доступность той или иной исходной информации также могут меняться. Такие ситуации требуют адаптированных к ним постановок задач выбора оптимальных режимов работы объекта и разработки эффективных алгоритмов их решения.

Рассмотрим ситуацию, когда можно применить идеи методов главного критерия и принципа Парето оптимальности [17, 25]. В этой ситуации ЛПР, специалисты-эксперты могут выделить главный критерий $\mu_0^1(\mathbf{x})$ и назначить граничные значения для остальных локальных критериев μ_R^i , $i=2, m$, а также назначить весовые коэффициенты для ограничений β_1, \dots, β_L , учитывающих их важности. По требованию принципа Парето оптимальности количество оцениваемых объектов, в данном случае ограничений, не должно быть слишком большим, т. е. не более 7 ± 2 . В этом случае постановку задачи многокритериального выбора оптимальных режимных параметров агрегатов магистрального нефтепровода с вектором ограничений можно записать в виде [5, 26]:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (3)$$

$$X = \left\{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge \arg(\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \bigwedge_{i=2, m, q=1, L} \arg \max_{\mathbf{x} \in \Omega} \sum_{q=1}^L \beta_q \mu_q(\mathbf{x}) \sum_{q=1}^L \beta_q = 1 \wedge \beta_q > 0, \right\}. \quad (4)$$

В постановке задачи (3), (4) введено новое обозначение – μ_R^i – граничные значения частных критериев. $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2, m$. Они задаются с помощью ЛПР и специалистов-экспертов.

Решение полученной задачи многокритериального выбора (3), (4) зависит от μ_R^i , $i=2, m$ и β_1, \dots, β_L , меняя их можно получить набор решений $\mathbf{x}(\mu_R^i, \beta_q)$, $i=2, m$, $q=1, L$, затем производится выбор наилучшего из них ЛПР. На основе комбинированного применения принципов главного критерия и Парето оптимальности для нечеткой информационной среды можно предложить эвристический алгоритм решения полученной задачи (3), (4).

Рассмотрим ситуацию, когда специалисты-эксперты, ЛПР могут выделить главный критерий, а идеальные точки (желаемые значения ограничений) известны или их можно определить с участием ЛПР. В этой ситуации на основе модификации и комбинации принципов главного критерия (ГК) и идеальной точки (ИТ) можно записать следующую постановку задачи многокритериального выбора эффективных режимов нефтепровода:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (5)$$

$$X = \left\{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge (\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \bigwedge_{i=2, m, q=1, L} \arg \left(\mu_q(\mathbf{x}) \geq \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^*\|_D \right), \right\}. \quad (6)$$

В этой постановке задачи многокритериального выбора приняты обозначения: $\mu_0^i(\mathbf{x})$ – выбранный главный критерий; $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2, m$ – частные критерии, которые введены в состав ограничения; μ_R^i , $i=2, m$ – задаваемые ЛПР граничные значения частных критериев (кроме главного критерия); μ^* – идеальная точка; $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1, L$ – функции принадлежности, оценивающие степени выполнения нечетких ограничений; $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^*\|_D$ – используемая метрика D .

Координаты μ^* определяются в следующем виде: $\mu^* = (\max \mu_1(\mathbf{x}), \max \mu_L(\mathbf{x}))$ или в случае нормальных функций принадлежности – $\mu^* = (1, \dots, 1)$.

Блок-схема эвристического алгоритма на основе принципов главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ), предлагаемого для решения задачи многокритериального выбора при постановке (5), (6), приведена на рис. 2.

В блоках ввода (блок 1) и вывода (блок 9) приведенного алгоритма выбирается главный критерий с приоритетом 1 и выводятся наилучшие решения, выбранные ЛПР (блок 7) в процессе анализа текущих результатов, т. е. окончательное решение, удовлетворяющее ЛПР: $\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^*\|_D, i=2, m)$ – значения входных, режимных параметров, которые обеспечи-

вают оптимальные значения главного критерия и других частных критериев

$$\mu_0^1(\mathbf{x}^*(\|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E)), \mu_0^2(\mathbf{x}^*(\mu_R^2, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E)), \dots, \\ \mu_0^m(\mathbf{x}^*(\mu_R^m, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E)),$$

а также максимальные значения функций принадлежности выполнения нечетких ограничений

$$\mu_1(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E)), \dots,$$

$$\mu_L(\mathbf{x}^*(\mu_R^i, \|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E)), i = \overline{2, m}.$$

В блоке 8 с целью улучшения решения ЛПР производится корректировка граничных значений μ_R^i , $i = \overline{2, m}$ критериев, перенесенных в состав ограничения, и/или выбирается другой вид метрики $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E$.

Таким образом, решение задачи (5), (6) зависит от используемой метрики $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu''\|_E$, от μ_R^i , $i = \overline{2, m}$ и выбранных координат идеальной точки μ'' .

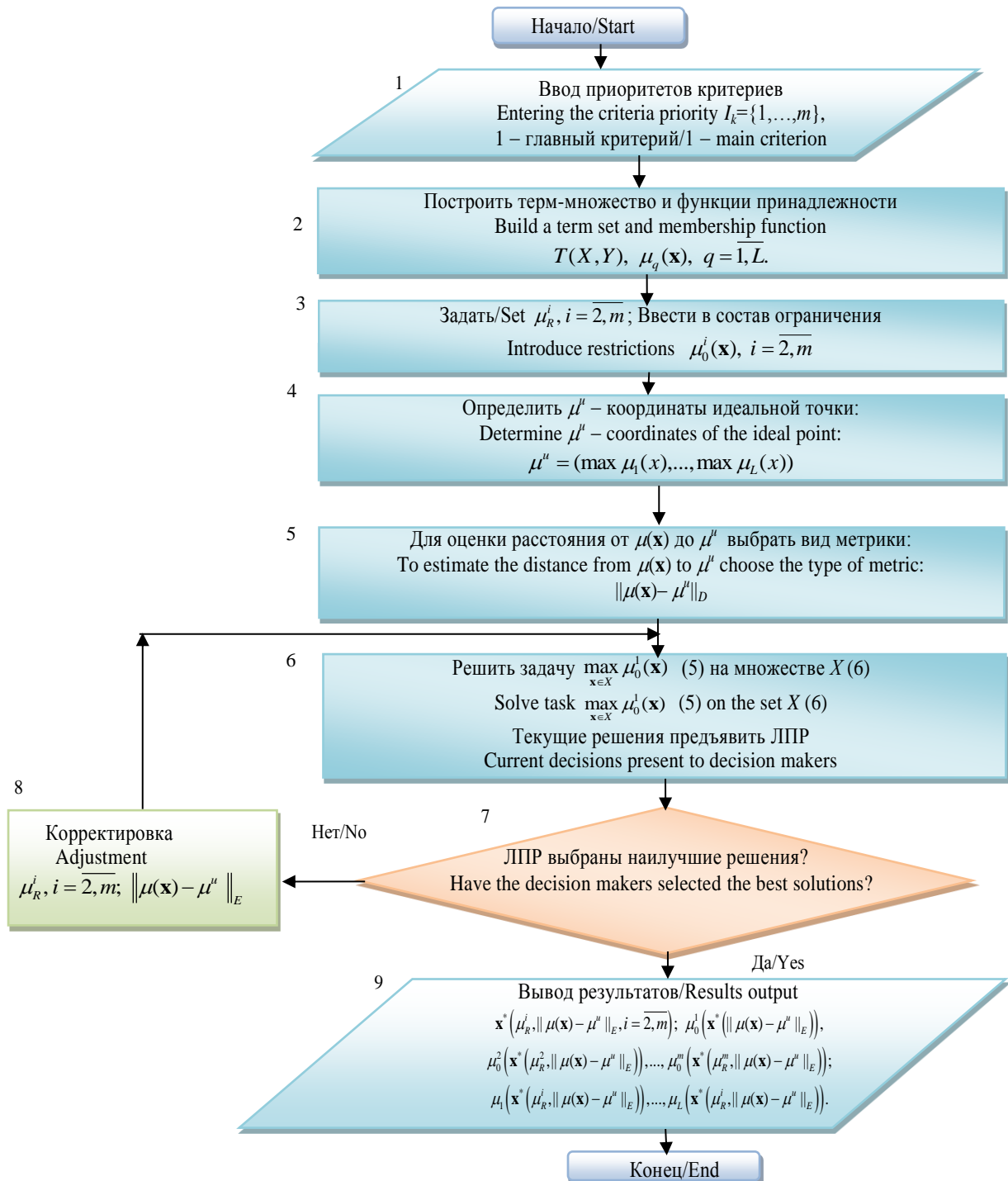


Рис. 2. Блок-схема эвристического алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ)

Fig. 2. Block diagram of a heuristic algorithm based on the principles of the main criterion and ideal point (MC+IP)

Приведем несколько вариантов использования евклидовой метрики ($D=E$):

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \beta_q \left(\frac{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})}{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x})} \right)^2, \quad (7)$$

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \beta_q \left(\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x}) \right)^2, \quad (8)$$

$$\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E^2 = \sum_{q=1}^L \left(\frac{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \beta_q \mu_q(\mathbf{x})}{\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x})} \right)^2. \quad (9)$$

Применение результатов на практике

Для практического применения полученных результатов используем описанный нечеткий подход при решении задачи многокритериального выбора режима работы технологических объектов. С этой целью приведем постановку и решение задачи выбора оптимального режима работы станции подогрева нефти (СПН) магистрального нефтепровода Узень-Самара в пункте Атырау. Основная задача СПН заключается в обеспечении необходимого температурного режима печей при перекачке высоковязкой нефти. При управлении СПН необходимо решить задачу выбора режимов работы печей, обеспечивающих оптимизацию критериев:

- минимизация себестоимости подогрева и перекачки нефти;
- экономия топлива и эксплуатационных расходов;
- максимизация объема перекачки нефти и производительности труда;
- повышение экологической безопасности объекта.

Объем перекачиваемой нефти можно определять показателями различных измерительных приборов, например, расходомерами. В исследуемом участке магистрального нефтепровода расход перекачиваемой нефти может принимать значения от 0,1960 до 0,1980 кг/с. На практике при измерении и оценке некоторых качественных показателей процесса перекачки и экологических показателей производства возникают проблемы, связанные с нечеткостью исходной информации. Определить эффективность работы технологического и производственного комплекса нефтепровода, экологической безопасности работы объекта одним числом очень трудно и не всегда удается. Часто измерение числовых значений этих показателей очень сложно или невозможно и характеризуется нечеткостью исходной информации. Качество работы технологических объектов, экологическое состояние производства обычно описываются нечеткими ограничениями типа: «не более», «не менее» и т. д. [22, 27].

Нефтеперекачивающее производство, как и любое другое производство, характеризуется и экономическими, и экологическими, и другими критериями. На практике требуется улучшить значения всех этих критериев, например, максимизировать объем перекачиваемой нефти, а расходы ресурсов и экологической нагрузки минимизировать. Так как эти критерии

в определенной области противоречат друг другу, оптимизация всех критериев одновременно становится невозможной. В этих ситуациях приходится решать задачу многокритериального выбора и принятия решений, позволяющую определить наилучшее решение в области компромиссов. Как было обосновано выше, такие задачи характеризуются нечеткостью и более эффективно решаются с привлечением ЛПР, т. е. эвристическими методами.

Формализуем задачу выбора наилучшего режима работы СПН пункта Атырау исследуемого нефтепровода. Для удобного применения методов теории нечетких множеств введем следующие обозначения: $\mu_0(\mathbf{x}) = (\mu_0^1(\mathbf{x}), \mu_0^2(\mathbf{x}), \mu_0^3(\mathbf{x}))$ – вектор нормализованных частных критериев, оценивающих качество работы станции подогрева нефти. Составляющими данного вектора, т. е. частными критериями являются: $\mu_0^1(\mathbf{x})$ – объем подогретой нефти на выходе (производительность) печи подогрева; $\mu_0^2(\mathbf{x})$ – температура на выходе печи; $\mu_0^3(\mathbf{x})$ – давление на выходе СПН.

Пусть $\varphi_q(\mathbf{x}) \leq b_q$, $q=1,2$ – нечеткие экологические ограничения. Считаем, что построены функции принадлежности, описывающие степени выполнения этих нечетких ограничений: $\mu_q(\mathbf{x})$, $q=1,2$. Также считаем, что задана или имеется возможность определения ряда приоритетов критериев $I_k = \{1,2,3\}$ и весовых коэффициентов ограничений β_1, β_2 .

Как видно, частные критерии $\mu_0^1(\mathbf{x}), \mu_0^2(\mathbf{x}), \mu_0^3(\mathbf{x})$ и нечеткие ограничения $\varphi_q(\mathbf{x}) \leq b_q$, $q=1,2$ зависят от вектора $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$, где x_1 – температура в печи, x_2 – давление в печи, x_3 – расход топлива на входе СПН, x_4 – расход (объем) нефти на входе СПН. Эти зависимости определяются на основе математических моделей СПН, которые разработаны в [17, 28–30].

Сформулированную задачу многокритериального выбора оптимальных режимов работы станции подогрева нефти в условиях нечеткости некоторой части исходной информации можно записать аналогично (5), (6) в следующем виде:

$$\max_{\mathbf{x} \in X} \mu_0^1(\mathbf{x}), \quad (5^*)$$

$$X = \left\{ \mathbf{x} : \mathbf{x} \in \Omega \wedge (\mu_0^i(\mathbf{x}) \geq \mu_R^i) \wedge \bigwedge_{i=2,3} \arg \left(\mu_q(\mathbf{x}) \geq \min_{\mathbf{x} \in \Omega} \|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E \right), \right. \\ \left. i = 2, 3, q = 1, 2 \right\}. \quad (6^*)$$

В постановке задачи (5^{*}), (6^{*}) используются следующие обозначения: $\mu_0^1(\mathbf{x})$ – максимизируемый главный критерий, в нашем случае производительность станции подогрева нефти; $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2,3$ – температура и давление на выходе СПН, частные критерии, перенесенные в состав ограничения; μ_R^i , $i=2,3$ – граничные значения локальных критериев, включенные в состав ограничений; μ^u – идеальная точка, означающая желаемое значение ограничения; $\mu_1(\mathbf{x}), \mu_2(\mathbf{x})$ – функции принадлежности выполнения нечетких ограничений; $\|\mu(\mathbf{x}) - \mu^u\|_E$ – используемая евклидова метрика E , $\mu^u = (\max \mu_1(\mathbf{x}), \max \mu_2(\mathbf{x}))$ или $\mu^u = (1,1)$ – координаты идеальной точки.

Наилучшим решением задачи многокритериального выбора эффективных режимов работы станции подогрева нефти (5*), (6*) пункта Атырау магистрального нефтепровода Узень–Атырау–Самара являются такие значения режимных параметров $x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*$, которые обеспечивают максимум $\mu_0^1(\mathbf{x})$ и максимальные степени выполнения нечетких ограничений $\mu_1(\mathbf{x})$, $\mu_2(\mathbf{x})$. При выборе решения учитывается предпочтение ЛПР, и при этом выбранные режимы работы станции подогрева нефти должны удовлетворять ЛПР.

Приведем результаты решения полученной задачи многокритериального выбора режимов работы СПН (5*), (6*) с применением модификации вышеописанного эвристического алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки (ГК+ИТ).

1. Специалистами-экспертами, ЛПР определен ряд приоритетов для частных критериев $I_k = \{1, 2, 3\}$. В качестве главного критерия выбрана производительность станции подогрева нефти (объем подогретой нефти), который имеет приоритет 1, приоритет 2 присвоен температуре на выходе печи, а давление на выходе печей имеет приоритет 3.

2. Для описания нечетких параметров и ограничений ЛПР, специалистами-экспертами определено терм-множество и построены функции принадлежности, оценивающие степени выполнения нечетких ограничений: $\mu_q(x)$, $q=1, 2$. Терм-множество состоит из следующих основных термов: «не более»; «около»; «не менее». При необходимости дополнительные термы получают из основных с применением различных модификаторов типа «очень», «примерно» и т. д. Построенные функции принадлежности выполнения нечетких ограничений имеют вид:

$$\mu_1(x) = \exp(0,20 | a_1 - 50,0 |^{0,5});$$

$$\mu_2(x) = \exp(0,10 | a_2 - 80,0 |^{0,7}),$$

где a_1 , a_2 – средние числовые значения нечетких параметров, соответственно: температуры и давления печи (СПН) на выходе, а другие параметры 0,20; 0,5; 0,10; 0,7 являются идентифицированными коэффициентами грубой и точной аппроксимации.

3. Разработаны модели для определения частных критериев $\mu_0^i(\mathbf{x})$, $i=2, 3$, которые перенесены в состав ограничения, и заданы граничные значения для них μ_R^i , $i=2, 3$:

$$\mu_2^2(x) = \begin{bmatrix} 7 + 1,2x_1 - 0,25x_2 + 5,7x_3 - \\ -1,3x_4 + 1,8x_1^2 + 8,3x_3^2 \end{bmatrix}; \mu_R^2 = 55;$$

$$\mu_0^3(x) = \begin{bmatrix} 0,25 - 1,31x_1 + 7,35x_2 - 3,1x_3 + \\ + 2,25x_4 + 9,85x_2^2 + 8,7x_3^2 \end{bmatrix}; \mu_R^3 = 8,5.$$

4. Так как функции принадлежности нечетких ограничений являются нормальными, координаты идеальной точки определены как: $\mu'' = (1, 1)$.

5. Для оценки расстояния между $\mu(\mathbf{x})$ и μ'' выбрана евклидова метрика $\|\mu(x) - \mu''\|_E$. В нашем случае вид метрики определен следующим образом:

$$\|\mu(x) - \mu''\|_E^2 = \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q \left(\max_{x \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x}) \right) \right)^2,$$

где β_q – весовой коэффициент q -го нечеткого ограничения, задаваемый ЛПР.

6. Решается задача максимизации главного критерия $\max_{x \in X} \mu_0^1(\mathbf{x})$ (5*) на множестве допустимых решений, определяемого по выражению (6*). При этом зависимость главного критерия от вектора режимных параметров $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ определена по модели, которая предложена в работах [17, 30], и имеет вид нечеткой модели после преобразования на основе множества уровня α , для $\alpha = 0,5; 0,85; 1$, имеет вид:

$$\begin{aligned} \mu_0^1(\mathbf{x}) = & \left(\frac{0,5}{2,000254727} + \frac{0,85}{2,007525117} + \frac{0,5}{2,088235294} + \frac{0,85}{2,175725157} + \frac{0,5}{2,787515357} \right) x_1 + \\ & + \left(\frac{0,5}{7,001000000} + \frac{0,85}{7,010000000} + \frac{0,5}{7,100000000} + \frac{0,85}{7,101523567} + \frac{0,5}{7,156572378} \right) x_2 - \\ & - \left(\frac{0,5}{5,005700000} + \frac{0,85}{5,012500000} + \frac{0,5}{5,680000000} + \frac{0,85}{5,750000000} + \frac{0,5}{5,950000000} \right) x_3 + \\ & + \left(\frac{0,5}{0,003700000} + \frac{0,85}{0,055000000} + \frac{0,5}{0,400000000} + \frac{0,85}{0,450000000} + \frac{0,5}{0,500000000} \right) x_4 + \\ & + \left(\frac{0,5}{0,000378677} + \frac{0,85}{0,007725335} + \frac{0,5}{0,061418685} + \frac{0,85}{0,097733375} + \frac{0,5}{0,134457767} \right) x_1^2 + \\ & + \left(\frac{0,5}{0,600000000} + \frac{0,85}{0,650000000} + \frac{0,5}{0,710000000} + \frac{0,85}{0,760000000} + \frac{0,5}{0,820000000} \right) x_2^2 - \\ & - \left(\frac{0,5}{0,180300000} + \frac{0,85}{0,200100000} + \frac{0,5}{0,227200000} + \frac{0,85}{0,247200000} + \frac{0,5}{0,267200000} \right) x_3^2 + \\ & + \left(\frac{0,5}{0,00000373} + \frac{0,85}{0,000077540} + \frac{0,5}{0,000563380} + \frac{0,85}{0,003735470} + \frac{0,5}{0,012557370} \right) x_4^2 - \\ & - \left(\frac{0,5}{0,006000000} + \frac{0,85}{0,007000000} + \frac{0,5}{0,008000000} + \frac{0,85}{0,009000000} + \frac{0,5}{0,010000000} \right) x_3 x_4. \end{aligned}$$

Затем нечеткие коэффициенты, детерминированные на α уровнях, объединяются по правилу теории нечетких множеств [16]. В приведенной модели значения коэффициентов регрессии везде оставлены девятизначными после десятичной точки, т. е. как в расчетном варианте на компьютерах.

Задача максимизации с учетом наложенных ограничений решена с использованием методов математического программирования [31]. Определены следующие текущие решения:

$$\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right),$$

$i=2,3$ – вектор режимных параметров;

$$\mu_0^1 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значение главного критерия,

$$\mu_0^2 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^3 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значения частных критериев, перенесенных в состав ограничения;

$$\mu_1 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_2 \left(\mathbf{x} \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$i=2,3$ – значения функции принадлежности, оценивающие степени выполнения ограничений.

7. Значения результатов каждого цикла предъявлены ЛПР (технологу и старшему оператору, управляющим процессом подогрева). С первого по пятый цикл ими вносились корректировки в значения $\mu_R^2(x)$, $\mu_R^1(x)$ и поиск приемлемого решения повто-

рялся, начиная с предыдущего пункта, а после пятого цикла получены решения, удовлетворяющие ЛПР, и произведен переход к пункту 8.

8. ЛПР принято окончательное решение, которое является наилучшим: значения управляющих, режимных параметров

$$\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right),$$

которые обеспечивают оптимальные значения частных критериев

$$\mu_0^1 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^2 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_0^3 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right)$$

и максимальные значения функций принадлежности выполнения ограничений

$$\mu_1 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right),$$

$$\mu_2 \left(\mathbf{x}^* \left(\mu_R^i, \sum_{q=1}^2 \left(\beta_q (\max_{\mathbf{x} \in \Omega} \mu_q(\mathbf{x}) - \mu_q(\mathbf{x})) \right)^2 \right) \right).$$

Числовые значения результатов, полученные после шестого цикла занесены в таблицу.

Таблица. Результаты решения задачи многокритериального выбора по детерминированному методу [27], по предложенному методу (ГК+ИТ) и реальным значениям (производственные данные)

Table. Results of solving the multi-criteria selection problem by the deterministic method [27], by the proposed method (MC+IP) and real values (production data)

Критерии и ограничения Criterion and limitations	Детерминированный метод Deterministic method	Алгоритм ГК+ИТ MC+IP algorithm	Реальные значения Actual values
Производительность СПН, кг/с – критерий \tilde{y}_1 Performance of oil heating stations, kg/s – criterion \tilde{y}_1	0,1960	≈0,1970	0,1965
Температура на выходе печи, К – критерий y_2 Furnace outlet temperature, K – criterion y_2	321,15	323,15	323,15
Давление на выходе печи, кПа – критерий y_3 Furnace outlet pressure, kPa – criterion y_3	101,51	96,54	96,70
Степень выполнения ограничения 1 – $\mu_1(\mathbf{x}^*(\beta))$ Degree of compliance with restriction 1 – $\mu_1(\mathbf{x}^*(\beta))$	–	1,0	–
Степень выполнения ограничения 2 – $\mu_2(\mathbf{x}^*(\beta))$ Degree of compliance with restriction 2 – $\mu_2(\mathbf{x}^*(\beta))$	–	0,98	–
Оптимальное значение вектора режимных параметров $\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$: Optimal value of the vector of operational parameters $\mathbf{x}^*=(x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*)$: x_1^* – оптимальная температура на входе печи, К x_1^* – optimal furnace inlet temperature, K	308,15	306,15	307,15
x_2^* – оптимальное давление на входе печи, кПа x_2^* – optimal furnace inlet pressure, kPa	125,40	117,04	119,42
x_3^* – оптимальный расход топлива, кг/с x_3^* – optimal fuel consumption, kg/s	0,0075	0,0069	0,0072
x_4^* – оптимальный объем сырья (нефти) на входе печи, кг/с x_4^* – optimal volume of raw materials (oil) at the inlet of the furnace, kg/s	0,1970	0,1970	0,1970

Примечание: (–) параметры не определяются и не измеряются. Время, необходимое для решения задач в методах почти одинаковое.

Note: (–) parameters are not determined and not measured. The time required to solve task in the methods is almost the same.

Обсуждение результатов

По результатам анализа и обсуждения решения задачи выбора эффективного режима работы исследуемой станции подогрева нефти с применением предложенного нечеткого подхода, которые приведены в таблице, можно отметить:

- при решении задачи многокритериального выбора режимов печей подогрева нефти разработанный эвристический алгоритм, основанный на принципах главного критерия и идеальной точки, позволяет получить результаты, которые лучше совпадают с реальными данными, по сравнению с результатами детерминированного подхода;
- так как нечеткая информация от специалистов-экспертов, ЛПР позволяет правильно учитывать сложную связь между параметрами производственного объекта – СПН, повышается адекватность и эффективность решения задачи выбора режимов работы управляемого реального объекта;
- преимуществом предложенного эвристического метода решения поставленной задачи также является то, что этот метод позволяет оценить и обеспечить выполнение нечетких ограничений.

Правильность результатов решения поставленной задачи многокритериального выбора обеспечивается корректным использованием методов экспертных оценок и теории нечетких множеств, а также методов многокритериальной оптимизации и принятия решений. Как видно из приведенной таблицы, расчетные результаты, полученные на основе предложенного алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки, лучше совпадают с реальными данными, а степени выполнения нечетких ограничений достаточно высокие (1; 0,98).

Заключение

На основе модификации и комбинации различных принципов оптимальности предложены новые постановки задач многокритериального выбора режимов работы технологических агрегатов (на примере станции подогрева нефти нефтепровода) в условиях нечеткости исходной информации и разработаны эвристические методы решения поставленных задач. Предложенные методы основаны на использовании идеи различных принципов оптимальности, комбинации компромиссных схем принятия решений. Постановки конкретных задач получены путем комбинации принципов относительной уступки и равенства, главного критерия и идеальной точки, на основе адаптации их для нечеткой среды.

В качестве основных результатов исследования можно выделить:

- исследованы и формализованы задачи многокритериального выбора эффективных режимов работы технологических объектов (на примере агрегатов магистрального нефтепровода), которые ха-

рактеризуются многокритериальностью и нечеткостью исходной информации;

- сформулирована математическая постановка задачи выбора оптимальных режимов работы объектов нефтепровода в условиях многокритериальности и нечеткости. Показано, что путем модификации и адаптации различных принципов оптимальности для работы в нечеткой информационной среде можно получить различные постановки задач многокритериального выбора режимов магистрального нефтепровода;
- на основе принципов относительной уступки и равенства, главного критерия и идеальной точки получены постановки задачи многокритериального выбора при нечеткости исходной информации и разработаны эвристические алгоритмы их решения.

Также приведены результаты реализации предложенного подхода на практике при решении задачи многокритериального выбора оптимального режима работы станции подогрева нефти магистрального нефтепровода Узень–Самара в пункте г. Атырау. Для практической реализации предложенного подхода к решению поставленной задачи выбран предложенный эвристический алгоритм, основанный на принципах главного критерия и идеальной точки. По результатам расчета обоснована эффективность применения нечеткого подхода к решению задач многокритериального выбора режимов работы СПН с использованием эвристического алгоритма, основанного на принципах главного критерия и идеальной точки.

Оригинальность и новизна работы заключается в том, что задача многокритериального выбора на основе эвристических алгоритмов решается в нечеткой среде. При этом в отличие от известных методов не производится замена исходной нечеткой задачи с эквивалентными детерминированными задачами. Это позволяет максимально использовать исходную нечеткую информацию и получить адекватное решение производственной задачи в условиях нечеткости. Таким образом, обеспечивается эффективное применение методов многокритериального выбора в нечеткой среде.

Практическим преимуществом предложенного подхода к решению задач многокритериального выбора в нечеткой среде является то, что в зависимости производственной ситуации и доступности исходной информации различного характера ЛПР дается возможность выбора более подходящего, приемлемого способа решения задачи из предложенного набора алгоритмов.

Перспективы дальнейших научных исследований в данном направлении заключается в разработке математического обеспечения различных систем управления, например, интеллектуализированных систем поддержки принятия решений по управлению режимами работы технологических объектов магистрального нефтепровода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайншток С.М. Трубопроводный транспорт нефти. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 407 с.
2. Бакаев А.А., Олеряш Г.Б., Иванова Д.С. Математическое моделирование при проектировании трубопроводов. – Киев: Наукова думка, 1990. – 357 с.
3. Селезнев В.Е., Прялов С.Н. Методы построения моделей течений в магистральных трубопроводах. – М.: Едиториал, 2018. – 565 с.
4. Larichev O.I. Properties of the decision methods in the multicriteria problems of individual choice // Automation and Remote Control. – 2002. – V. 63. – № 2. – P. 304–315.
5. Abdymanapov S.A., Barlybayev A., Kuzenbaev B.A. Quality evaluation fuzzy method of automated control systems on the LMS example // IEEE Access. – 2019. – V. 7. – P. 138000–138010. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2943000
6. Decision-making in the fuzzy environment on the basis of various compromise schemes / B. Orazbayev, E. Ospanov, N. Kissikova, N. Mukataev, K. Orazbayeva // Procedia Computer Science. – 2017. – V. 120. – P. 945–952.
7. Groppen V.O. Principles of reference-aided decision-making // Automation and Remote Control. – 2006. – V. 67. – № 4. – P. 660–675.
8. Dimitriadi G.G., Larichev O.I. Decision support system and the ZAPROS-III method for ranking the multiattribute alternatives with verbal quality estimates // Automation and Remote Control. – 2005. – V. 66. – № 8. – P. 1322–1335.
9. A hybrid method for the development of mathematical models of a chemical engineering system in ambiguous conditions / B.B. Orazbayev, E.A. Ospanov, K.N. Orazbayeva, L.T. Kurmangazieva // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2018. – V. 10. – № 6. – P. 748–758.
10. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 325 с.
11. Rademaker M., Bernard B. Aggregation of monotone reciprocal relations with application to group decision making // Fuzzy Sets and Systems. – 2018. – V. 184. – P. 29–51.
12. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale optimization for process systems engineering // Computers and Chemical Engineering. – 2016. – № 10. – P. 17–35.
13. Promoting data requirement for the oil & gas pipeline integrity management / Zhenpei Li, Jinfei Wang, R. Brook, R. Easton // Oil Gas European Magazine. – 2017. – V. 132. – P. 167–193.
14. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: old techniques and new directions // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – V. 184. – P. 3–17.
15. Сулейменов Б.А. Интеллектуальные и гибридные системы управления технологическими процессами. – Алматы: Изд-во «Пикета и К», 2009. – 304 с.
16. Рыжов А.П. Теория нечетких множеств и ее приложений. – М.: Изд-во МГУ, 2017. – 115 с.
17. Оразбаев Б.Б., Мухамбеткалиева А.К., Мырзашева А.Н. Задачи принятия решений для управления технологическим объектом в нечеткой среде и эвристические методы их решения // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. – 2017. – № 4 (119). – С. 142–147.
18. Богданов Р.М. Программный комплекс для моделирования работы магистральных трубопроводов // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2014. – № 1. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bogdanov/Bogdanov_4.pdf (дата обращения 01.08.2019).
19. Grebenyuk G.G. Mathematical modeling as a decision tool in the control of urban heat supply // Automation and Remote Control. – 2006. – V. 67. – № 5. – P. 805–812.
20. Зыков В.В. Математическое моделирование и оптимизации процессов сбора, подготовки и транспортировки нефти и газа. – Тюмень: Недра, 1990. – 327 с.
21. Baronets V.D., Grechikhin M.A. A model for representing the membership function in expert systems // Automation and Remote Control. – 2017. – V. 53. – № 6. – P. 921–925.
22. The etalon models of linguistic variables for sniffing-attack detection / M. Karpinski, A. Korchenko, P. Vikulov, R.R. Kochan, A. Balyk, R. Kozak // 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017). – Bucharest, Romania, 21–23 September 2017. – P. 258–264. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095087
23. Многокритериальная оптимизация при управлении химико-технологической системой производства бензола при нечеткой информации / Б.Б. Оразбаев, Е.А. Оспанов, К.Н. Оразбаева, Б.А. Серимбетов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 182–194.
24. Применение эвристических алгоритмов в анализе данных для решения задачи диагностирования электроцентробежных насосных установок / Р.И. Валиахметов, В.У. Ямалиев, С.С. Шубин, А.В. Алферов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 159–167.
25. Pershin Yu. Pareto-optimal and lexicographic solutions of mixed-integer problems that are linear with respect to continuous variables // Automation and Remote Control. – 1994. – V. 55. – № 2. – P. 263–270.
26. Czuprat O. Simulation method aids pigging operation in subsea waxy crude oil pipelines // Oil Gas European Magazine. – 2018. – V. 132. – P. 200–223.
27. Определение ряда оптимальных режимов работы магистральных трубопроводов при выбранных критериях оптимальности (ОРОПМТ): пат. Рос. Федерация № 2011611173, заявл. 15.01.10; опубл. 04.02.11, Бюл. № 2. – 1 с.
28. Calculations for energy-saving modes for batching oil blends itrunk pipelines / U.K. Zhabbasbaev, E.S. Makhmotov, G.I. Ramazanov, T.T. Bekibaev // Pipeline Science and Technology. – 2018. – V. 2. – № 3. – P. 221–230.
29. Селезнев В.Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем: методы, модели и алгоритмы. – М.: МаксПресс. 2009. – 695 с.
30. Мухамбеткалиева А.К. Проблемы математического моделирования технологического комплекса магистральных нефтепроводов и подходы к их решению // Поиск. – 2006. – № 4. – С. 229–235.
31. Grossmann I.E. Challenges in the application of mathematical programming in the enterprise-wide optimization of process industries // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48. – № 5. – С. 500–517.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Оразбаев Б.Б., доктор технических наук, профессор кафедры системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

Оразбаева К.Н., доктор технических наук, профессор кафедры менеджмента Казахского университета экономики, финансов и международной торговли.

Утенова Б.Е., кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производства и информационных технологий Атырауского университета нефти и газа.

Шагаева А.Б., старший преподаватель кафедры автоматизации производства и информационных технологий Атырауского университета нефти и газа.

Касимова Б.Р., кандидат технических наук, доцент кафедры системного анализа и управления Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева.

UDC 519.81: 629.359

MULTI-CRITERIA SELECTION OF OPERATING MODES OF MAIN PIPELINE UNITS DURING OIL TRANSPORTATION WITH FUZZY INFORMATION

Batyr B. Orazbayev¹,
batyr_o@mail.ru

Kulman N. Orazbayeva²,
kulman_o@mail.ru

Balbupe E. Utenova³,
balbupe_u_e@mail.ru

Ainur B. Shagayeva³,
ai_b_sh@mail.ru

Botakoz R. Kassimova¹,
Kassimovabotagoz@gmail.com

¹ L.N. Gumilyov Eurasian National University,
11, Pushkin street, Nur-Sultan, 010008, Kazakhstan.

² Kazakh University of Economics, Finance and International Trade,
7, Zhubanov street, Nur-Sultan, 010005, Kazakhstan.

³ Atyrau University of Oil and Gas,
45, Baimukhanov street, Atyrau, 060006, Kazakhstan.

The relevance of the research is justified by the fact that when managing oil transportation through trunk pipelines, it becomes necessary to determine and select the optimal operating modes of the pipeline units, taking into account the vagueness of some part of the initial information. In this regard, the formulation and solution of the problems of multi-criteria selection of effective operating modes of technological objects of the oil pipeline system, which are often described in a fuzzy information environment based on the mathematical apparatus of fuzzy sets, is an urgent scientific and practical task.

The main aim of the research is to formulate the problem statements of the multi-criteria selection of operating modes of technological objects with fuzzy initial information based on the adaptation of various principles of optimality and develop heuristic methods for their solution, which are based on attracting a decision maker in solving the problem. Implement the proposed fuzzy approach to solving the problem of selecting the optimal operating mode for the oil heating station of the Uzen–Samara trunk oil pipeline in Atyrau.

Objects: technological units of the main oil pipeline, which are characterized by multi-criteria and unclear certain restrictions.

Methods: methods of theories of fuzzy sets, methods of multicriteria choice, heuristic methods, methods of fuzzy mathematical programming.

Results. The authors have stated the problems of multi-criteria selection of operating modes of technological units of main oil pipelines in the conditions of fuzziness of some part of the initial information and developed the heuristic methods for their solution. The proposed heuristic methods of multi-criteria selection in a fuzzy environment are developed based on the application of experience and knowledge of the decision maker and modification of various optimality principles for working in a fuzzy environment. To ensure that the decision maker can choose a more convenient method of solving the choice problem depending on the availability and accessibility of the source information, the current situation, a set of statement of the choice problem is proposed by applying various principles of optimality (compromise decision-making schemes) and their combination. The proposed approach was implemented in formulating and solving the problem of multi-criteria selection of operating modes of the pipeline with the aim of optimally controlling the process of pumping oil through the Uzen–Atyrau–Samara trunk pipeline (Kulsary–Atyrau section) with the involvement of a person, i. e. applying fuzzy information in the form of his/her experience, knowledge and intuition. The obtained results confirmed the effectiveness of the proposed approach to solving the tasks.

Key words:

Multi-criteria selection, oil transportation, oil trunk pipelines, fuzzy information, decision maker, heuristic method.

REFERENCES

1. Vainshtok S.M. *Truboprovodny transport nefi* [Pipeline transportation of oil]. Moscow, Nedra-Business Center LLC Publ., 2002. 407 p.
2. Bakaev A.A., Oleryash G.B., Ivanina D.S. *Matematicheskoe modelirovanie pri proektirovanii truboprovodov* [Mathematical modeling in the design of pipelines]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 357 p.
3. Seleznev V.E., Pryalov S.N. *Metody postroeniya modeley techeniy v magistralnykh truboprovodakh* [Methods for constructing models of flows in main pipelines]. Moscow, Editorial Publ., 2018. 565 p.
4. Larichev O.I. Properties of the decision methods in the multicriteria problems of individual choice. *Automation and Remote Control*, 2002, vol. 63, no. 2, pp. 304–315.
5. Abdymanapov S.A., Barlybayev A., Kuzenbaev B.A. Quality evaluation fuzzy method of automated control systems on the LMS example. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 138000–138010. DOI :10.1109/ACCESS.2019.2943000
6. Orazbayev B., Ospanov E., Kissikova N., Mukataev N., Orazbayeva K. Decision-making in the fuzzy environment on the basis of various compromise schemes. *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 120, pp. 945–952.
7. Groppen V.O. Principles of reference-aided decision making. *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 4, pp. 660–675.

8. Dimitriadi G.G., Larichev O.I. Decision support system and the ZAPROS-III method for ranking the multiattribute alternatives with verbal quality estimates. *Automation and Remote Control*, 2005, vol. 66, no. 8, pp. 1322–1335.
9. Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Kurmangazieva L.T. A hybrid method for the development of mathematical models of a chemical engineering system in ambiguous conditions. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 748–758.
10. Orlovsky S.A. *Problemy prinyatiya resheniy pri nechetkoy iskhodnoy informatsii* [Decision-making problems with fuzzy initial information]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 325 p.
11. Rademaker M., Bernard B. Aggregation of monotone reciprocal relations with application to group decision making. *Fuzzy Sets and Systems*, 2018, vol. 184, pp. 29–51.
12. Biegler L.T., Lang Y.D., Lin W.J. Multi-scale optimization for process systems engineering. *Computers and Chemical Engineering*, 2016, no. 10, pp. 17–35.
13. Zhenpei Li, Jinfei Wang, Brook R., Easton R. Promoting data requirement for the oil & gas pipeline integrity management. *Oil Gas European Magazine*, 2017, vol. 132, pp. 167–193.
14. Dubois D. The role of fuzzy sets indecision sciences: old techniques and new directions. *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, vol. 184, pp. 3–17.
15. Suleimenov B.A. *Intellektualnye i gibridnye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Intelligent and hybrid process control systems]. Almaty, Pikula and K Publ., 2009. 304 p.
16. Ryzhov A.P. *Teoriya nechetkikh mnozhestv i ee prilozheniy* [The theory of fuzzy sets and its applications]. Moscow, Moscow State University Publ. House, 2017. 115 p.
17. Orazbayev B.B., Mukhambetkalieva A.K., Myrzasheva A.N. Decision problems for managing a technological object in a fuzzy environment and heuristic methods for solving them. *Bulletin of the Eurasian National University*, 2017, no. 4, pp. 142–147. In Rus.
18. Bogdanov R.M. A software package for modeling the operation of trunk pipelines. *Oil and gas business: electronic scientific journal*, 2014, no. 1. Available at: http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Bogdanov/Bogdanov_4.pdf (accessed 1 August 2019).
19. Grebenyuk G.G. Mathematical modeling as a decision tool in the control of urban heat supply. *Automation and Remote Control*, 2006, vol. 67, no. 5, pp. 805–812.
20. Zikov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsii protsessov sbora, podgotovki i transportirovki nefi i gaza* [Mathematical modeling and optimization of the processes of collection, preparation and transportation of oil and gas]. Tyumen, Nedra Publ., 1990. 327 p.
21. Baronets V.D., Grechikhin M.A. A model for representing the membership function in expert systems. *Automation and Remote Control*, 2017, vol. 53, no. 6, pp. 921–925.
22. Karpinski M., Korchenko A., Vikulov P., Kochan R., Balyk A., Kozak R. The etalon models of linguistic variables for sniffing-attack detection. *9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2017)*. Bucharest, Romania, September 21–23, 2017. pp. 258–264. DOI: 10.1109/IDAACS.2017.8095087
23. Orazbayev B.B., Ospanov E.A., Orazbayeva K.N., Serimbetov B.A. Multicriteria optimization in control of a chemical-technological system for production of benzene with fuzzy information. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 330, no. 7, pp. 182–194. In Rus.
24. Valiakhmetov R.I., Yamaliev V.U., Shubin S.S., Alferov A.V. Application of heuristic algorithms in analyzing data to solve the problem of detection of electric centrifugal pumping units. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 2, pp. 159–167. In Rus.
25. Pershin Yu. Pareto-optimal and lexicographic solutions of mixed-integer problems that are linear with respect to continuous variables. *Automation and Remote Control*, 1994, vol. 55, no. 2, pp. 263–270.
26. Czuprat O. Simulation method aids pigging operation in subsea waxy crude oil pipelines. *Oil Gas European Magazine*, 2018, vol. 2, pp. 200–223.
27. Bogdanov R.M., Lukin S.V. *Opreделение ryada optimalnykh rezhimov raboty magistralnykh truboprovodov pri vybrannykh kriteriyakh optimalnosti* [Determination of a number of optimal modes of operation of trunk pipelines under selected optimality criteria]. Patent RF, no. 2011611173, 2011.
28. Zhapbasbaev U.K., Makhmotov E.S., Ramazanova G.I., Bekibaev T.T. Calculations for energy-saving modes for batching oil blends itrunk pipelines. *Pipeline Science and Technology*, 2018, vol. 2, no. 3, pp. 221–230.
29. Seleznev V.E. *Matematicheskoe modelirovanie truboprovodnykh setey i sistem: metody, modeli i algoritmy* [Mathematical modeling of pipeline networks and systems: methods, models and algorithms]. Moscow, MaxPress Publ., 2009. 695 p.
30. Mukhambetkalieva A.K. Problems of mathematical modeling of the technological complex of main oil pipelines and approaches to their solution. *Poisk*, 2006, no. 4. pp. 229–235. In Rus.
31. Grossmann I.E. Challenges in the application of mathematical programming in the enterprise-wide optimization of process industries. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, no. 5, pp. 500–517.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Batyr B. Orazbayev, Dr. Sc, professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Kulman N. Orazbayeva, Dr. Sc, professor, Kazakh University of Economics, Finance and International Trade.

Balbupe E. Utenova, Cand. Sc., associate professor, Atyrau University of Oil and Gas.

Ainur B. Shagayeva, senior lecturer, Atyrau University of Oil and Gas.

Botakoz R. Kassimova, Cand. Sc., associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University.

УДК 662.638

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ

Табакаев Роман Борисович¹,
TabakaevRB@tpu.ru

Алтынбаева Дарига Бахитжановна¹,
dba10@tpu.ru

Ибраева Канипа Талгатовна¹,
kti1@tpu.ru

Заворин Александр Сергеевич¹,
zavorin@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена тенденцией увеличения доли использования возобновляемых источников энергии в топливно-энергетическом балансе для снижения вредного воздействия на окружающую среду.

Цель: определение кинетических параметров пиролиза биомассы методом Г. Фридмана на основе результатов дифференциального термического анализа.

Объекты: солома, отходы зернопереработки (пшеничные отруби), скорлупа кедровых орехов, сосновые опилки, низинный торф Суховского месторождения, а также отходы жизнедеятельности крупнорогатого скота.

Методы. Теплотехнические характеристики образцов биомассы определены согласно аттестованным методикам (ГОСТ 11305-2013, ГОСТ 11306-2013, ГОСТ Р 54186-2010, ГОСТ Р 56881-2016, ГОСТ 32990-2014); значения теплоты сгорания установлены при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия) в соответствии с ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009); элементный анализ её органической части проведен на приборе VarioMicroCube (Elementar, Германия); кинетические характеристики низкотемпературного пиролиза биомассы определены методом Г. Фридмана на основе дифференциального термического анализа, проведенного при температуре 313–1273 К при скорости нагрева 5, 15 и 30 К/мин.

Результаты. Термическое разложение биомассы в интервале 313–1273 К происходит в две стадии: первая стадия протекает в интервале температур от 463–488 до 623–653 К и характеризуется резким снижением массы образцов от 24 (торф) до 63 % (опилки); вторая стадия наблюдается от 623–653 до 873 К со значительно меньшим изменением массы образцов (от 9 до 14 %). При дальнейшем увеличении температуры органическая часть образцов практически не претерпела преобразования, изменения произошли только в минеральной части торфа при температуре 923–1123 К и обусловлены разложением карбоната кальция. Определены зависимости энергии активации (E_a) от степени конверсии биомассы (w/w_0), по которым рассчитаны её средние значения: для соломы ($E_{a_{cp}}^{co}$) – 21,4 кДж моль⁻¹; для опилок ($E_{a_{cp}}^{op}$) – 20,7 кДж моль⁻¹; для скорлупы ($E_{a_{cp}}^{sk}$) – 24,2 кДж моль⁻¹; для отходов жизнедеятельности крупнорогатого скота ($E_{a_{cp}}^{h}$) – 23,1 кДж моль⁻¹; для отрубей ($E_{a_{cp}}^{ot}$) – 33,1 кДж моль⁻¹; для торфа ($E_{a_{cp}}^t$) – 24,0 кДж моль⁻¹. Значения предэкспоненциального множителя (A) для исследуемых видов биомассы находятся в диапазоне 82,42–2377,01 час⁻¹.

Ключевые слова:

Биомасса, термическая переработка, дифференциальный термический анализ, кинетика, метод Фридмана.

Введение

Традиционная энергетика, основанная на сжигании ископаемых органических топлив (угля, газа и нефтяных продуктов), является одним из основных источников загрязнения окружающей среды и изменения климата планеты [1, 2]. Техногенное воздействие энергетики на окружающую среду приводит к существенно ухудшению здоровья и преждевременной смертности населения [3]. Учитывая прогнозируемый рост населения планеты [4–6], неизбежно сопровождающийся ростом энергопотребления [7], мировое энергетическое сообщество стремится к переходу на экологически чистую энергетику, повышению энерго- и ресурсоэффективности природопользования.

В связи с этим во многих странах особое внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [8–12]. Согласно данным Международного энергетического агентства доля энергии, выработанной на основе ВИЭ, в мировом масштабе

составляет 11,5 % (без учета гидроэнергетики) [13]. При этом некоторыми странами даже рассматриваются сценарии [8, 14–18] по полному переводу энергетики на ВИЭ в обозримом будущем.

Согласно [19] среди различных видов ВИЭ в топливно-энергетическом балансе значительная доля использования отводится биомассе. Она является наиболее распространенным источником среди прочих видов ВИЭ [20, 21], что делает её универсальным ресурсом для повсеместного использования. Актуальность вовлечения в энергетику для биомассы обусловлена также тем, что она по большей части представлена отходами различных сфер деятельности (опилки, лузга, солома, отходы зернопереработки и т. п.) или продуктами разложения органики (торф, ил водоемов). Оставаясь неиспользованными, эти ресурсы могут нанести вред окружающей среде или создать потенциальную опасность возгорания, приводя к природным и антропогенным пожарам [22–25].

Традиционные технологии сжигания органических топлив, успешно применяемые для угля, зачастую оказываются неэффективными при использовании биомассы. Это обусловлено её специфическими характеристиками. В исходном состоянии биомасса имеет высокую влажность (30,4–79,7 % [26]), что существенно осложняет процесс транспортировки при низких температурах окружающего воздуха (смерзается в зимний период) [27] и требует при сжигании высоких эксплуатационных затрат на испарение влаги. Несмотря на низкое значение зольности биомассы, её минеральная часть в процессе горения приводит к шлакованию поверхностей нагрева [28, 29]. Мелкий фракционный состав (например, при рассмотрении опилок или соломы) и крошимость не позволяют сжигать биомассу в слоевых топочных устройствах без их модернизации.

В связи с вышеописанным необходимо искать альтернативные пути, позволяющие вовлечь ресурсы биомассы в мировой топливно-энергетический баланс. Одним из перспективных направлений, позволяющих перерабатывать биомассу в химически и энергетически ценные продукты, является пиролиз. Пиролиз представляет собой многостадийный процесс термического разложения органического сырья при отсутствии кислорода. В процессе пиролиза образуются твердый углеродистый остаток, жидкие продукты (пирогенетическая вода и смола) и горючий газ, состав и характеристики которых существенно зависят от природы исходного сырья, температурного режима, давления, скорости нагрева сырья и длительности его переработки. Столь сложная зависимость, учитывающая большое количество параметров, и многообразность протекающих при этом химических реакций приводят к тому, что наиболее распространенным методом исследования пиролиза всё ещё остается физический эксперимент [30–34]. Однако ведутся исследования по разработке алгоритмов численных методов изучения и моделированию процессов термического разложения биомассы, способных существенно снизить временные и трудовые затраты при проектировании оборудования, его наладке и внедрении в технологический процесс. Реализация этой задачи требует подробного изучения кинетики происходящих при пиролизе процессов.

В теории химической кинетики широко известны два подхода к определению кинетических характеристик (энергии активации и предэкспоненциального множителя) процессов химического реагирования [35, 36]: экспериментальные методы без построения модели и методы подбора моделей. Последние методы являются достаточно трудоемкими, т. к. для достоверного описания реальных процессов необходимо использовать сложный математический аппарат и соответствующие программные комплексы, например, при проведении квантохимических расчетов [37]. В случае упрощения этих методов необходимо обобщивать большое количество допущений. Например, обычно считается, что плавное изменение параметров процесса химического реагирования не приводит к резкому изменению кинетических характеристик, что

в реальных условиях не всегда выполняется. Поэтому для оценки достоверности полученных кинетических характеристик необходимо воспроизведение натуральных условий эксперимента.

Методы без построения модели (методы Фридмана, Коутса и Редферна, Киссинджера–Акахиры–Суносе, Озавы–Флинна–Уолла и др.) являются менее трудоемкими и более надежными [38–41], поэтому они более широко используются для вычисления кинетических характеристик процессов по данным об изменении массы образцов (термогравиметрического анализа – ТГ) в процессе термического разложения. Получаемые при расчете кинетики характеристики являются в дальнейшем исходными данными для разработки прогностических математических моделей и проведения численного моделирования соответствующих физико-химических процессов в широких диапазонах варьирования параметров исследуемой системы и внешних воздействий.

Исследование кинетических параметров биомассы встречается во многих работах, например, в [42–45]. Однако необходимо отметить, что согласно [46] характеристики биомассы демонстрируют большую вариативность даже в зависимости от её вида, типа растительности, стадии роста и условий выращивания. Эти свойства обычно оказывают большое влияние на скорость сгорания биомассы, способ сжигания, выбросы и общую эффективность сжигания, а соответственно и на кинетические параметры. Это приводит к необходимости изучения кинетики для каждого отдельного вида биомассы применительно к конкретному региону её происхождения.

В настоящей работе рассматриваются ресурсы биомассы Томской области, являющейся, как и многие другие регионы в Российской Федерации, зависимой от поставок угля с крупных угольных месторождений (Кузбасса или Красноярского края) [47]. При этом область имеет собственные, неиспользуемые на данный момент запасы биоресурсов – торфа, древесины, отходов агропромышленного комплекса [47–49], для энерготехнологического использования которых необходимо изучение кинетических параметров пиролиза. В связи с вышеописанным, целью настоящей работы является определение кинетических параметров пиролиза биомассы Томской области методом Г. Фридмана на основе результатов дифференциального термического анализа.

Методика исследования

Объект исследования

В качестве исходного сырья для исследований рассмотрено несколько видов биомассы различного происхождения: солома, отходы зернопереработки (пшеничные отруби), скорлупа кедровых орехов, сосновые опилки, низинный торф Суховского месторождения, а также отходы жизнедеятельности крупнорогатого скота (ОЖКС). Предварительно пробы высушены до воздушно-сухого состояния.

Влажность и зольность торфа определяли по соответствующим стандартам ГОСТ 11305-2013 и ГОСТ 11306-2013, для остальных видов биомассы исполь-

зованы ГОСТ Р 54186-2010 (EN 14774-1: 2009) и ГОСТ Р 56881-2016 (E1755-01). Выход летучих веществ для всех видов биомассы устанавливали согласно методике ГОСТ 32990-2014 (EN 15148: 2009). Теплоту сгорания биомассы определяли при помощи калориметра АБК-1 (РЭТ, Россия) в соответствии с ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009). Элементный анализ её органической части проводили на приборе VarioMicroCube (Elementar, Германия).

Дифференциальный термический и гравиметрический анализы

Перед анализом каждую пробу высушивали в лаборатории до достижения воздушно-сухого состояния, после чего измельчали на планетарной мельнице «Pulverisette 6» (FRITSCH, Германия) до пылевидного состояния (размер фракций менее 200 мкм).

Для исследования пиролиза биомассы и расчета его кинетических параметров проведены термогравиметрический анализ (ТГ) и дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) на синхронном термоанализаторе STA 449 F5 Jupiter (Netzsch, Германия). Параметры проведения анализа включали: масса каждой пробы составила 20 мг, скорость нагрева образцов – 5, 15 и 30 К/мин., температурный интервал нагрева – 313–1273 К. Анализы выполнены в инертной среде аргона (расход 20 мл в минуту) с целью имитации условий осуществления пиролиза.

Данные ТГ использованы для определения кинетических характеристик процесса пиролизического разложения биомассы методом Генри Фридмана [39].

Кинетика термического разложения

Согласно рекомендациям Международной конфедерации термического анализа и калориметрии (ICTAC) [50] установление зависимости энергии активации (E_a) от степени конверсии образца (w/w_0) является достаточным условием для кинетического описания процесса. В связи с этим для расчета кинетики процесса применен метод Г. Фридмана.

Изоконверсионный метод Фридмана используется для описания стадий процесса химического реагирования, в которых степень превращения (w/w_0) экспериментального образца одинакова [39]. Поэтому для оценки кинетических характеристик процесса горения методом Фридмана необходимы данные дифференциального термического анализа, полученные при нескольких скоростях нагрева образцов. Однако одна и та же степень превращения (w/w_0) достигается при разной температуре в зависимости от скорости нагрева. В [51–54] показано, что данные, полученные по методу Фридмана, имеют хорошую сходимость с результатами физического эксперимента.

Этот метод основан на взаимном сопоставлении результатов экспериментов, проведенных при разных скоростях нагрева образцов [39]. Метод Фридмана позволяет определить энергию активации процессов без построения модели их протекания. Уравнение, описывающее связь энергии активации и предэкспоненциального множителя, имеет вид [39]:

$$\ln \left(-\frac{1}{w_0} \frac{dw}{dt} \right) = \ln A + \ln \left[f \left(\frac{w}{w_0} \right) \right] - \frac{E}{RT}. \quad (1)$$

Отношения энергии активации к универсальной газовой постоянной ($-E/R$) определяются по наклону кривых, описывающих зависимости ($\ln((-1/w_0)(dw/dt))$) от ($1/T$) для группы значений степени превращения топлива (w/w_0). Произведения предэкспоненциального множителя и функции изменения массы образца ($\ln(Af(w/w_0))$) получают для каждого значения (w/w_0) в точках пересечения с осью ординат.

Далее согласно методу Фридмана принимается, что:

$$f(w/w_0) = [(w - w_f)/w_0]^n, \quad (2)$$

где w_f – масса образца при окончании процесса термического разложения, кг; n – кинетический порядок реакции, ($w - w_f$) – масса топлива, доступная для разложения в любой момент времени, кг.

В результате преобразований уравнений (1) и (2) Фридманом [39] получено:

$$\ln \left[Af \left(\frac{w}{w_0} \right) \right] = \ln A + n \ln \left[\frac{(w - w_f)}{w_0} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, согласно Фридману, получим, что график зависимости ($\ln(Af(w/w_0))$) от $\ln((w - w_f)/w_0)$ даст прямую линию, тангенс угла наклона которой равен n , а точка пересечения с ось ординат – $\ln(Af(w/w_0))$.

Исследование состава минеральной части

В процессе нагрева минеральная часть топлива может претерпевать изменения, сопровождающиеся потерей массы (например, при дегидрации монтмориллонита или разложения известняка), что отразится на результатах ТГ и приведет к неточности расчета кинетики. В связи с этим необходимо предваряющее исследование состава минеральной части биомассы для оценки её влияния на результаты ТГ.

С этой целью проведена рентгеновская дифрактометрия (XRD) рассматриваемых проб с использованием дифрактометра Shimadzu XRD7000 (CuK α -излучения) с счетчиком монохроматора Shimadzu CM-3121. Качественный рентгеновский анализ проводился с использованием базы данных PDF2+. При этом влажность анализируемых образцов соответствовала воздушно-сухому состоянию.

Обсуждение результатов

Теплотехнические характеристики биомассы

Теплотехнические характеристики исследуемой биомассы представлены в табл. 1. Видно, что зольность рассматриваемых проб представлена в широком диапазоне: от 1,0 % для скорлупы кедровых орехов до 22,8 % для суховского торфа. Зольность образцов соломы, отрубей, опилок и скорлупы ниже среднего значения для травянистой и сельскохозяйственной биомассы ($A^d=8,0$ %) [55]. Пробы ОЖКС и суховского торфа по величине зольности можно отнести к более минерализованным видам биомассы. Низшая теплота сгорания при достижении пробами воздушно-сухого состояния составляет 11,8–18,1 МДж/кг.

При рассмотрении суховского торфа, ОЖКС и пшеничных отрубей в качестве исходного сырья для изготовления топливных гранул можно прийти к выводу, что даже в высушенном состоянии низкое значение теплоты сгорания не позволит изготовить пеллеты и брикеты с характеристиками, удовлетворяющими требованиям стандартов DIN и DINplus (более $Q_i^r=17,5$ и 18 МДж/кг, соответственно) [56, 57].

Значительный выход летучих веществ из биомассы (69,7–83,4 %) свидетельствует о термической нестабильности ее органической массы и высокой реакционной способности при сжигании. Исследуемое сырье обладает низким содержанием серы (не более 0,07 % в пересчете на сухую беззольную массу), что

обеспечивает низкое значение количества выбросов оксидов серы (SO_x) при его сжигании даже при отсутствии сероочистки дымовых газов.

При помощи рентгенофазового анализа исследован состав минеральной части рассматриваемых проб. Установлено, что минеральная составляющая суховского торфа в основной своей массе представлена карбонатом кальция $CaCO_3$ и оксидом кремния SiO_2 (рис. 1). Изучить минералогический состав остальных проб не представилось возможным из-за возникающего в процессе анализа диффузионного гало, наличие которого обусловлено отсутствием кристаллического строения минерализованных компонентов.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики исследуемой биомассы

Table 1. Thermotechnical characteristics of biomass

Теплотехническая характеристика Thermotechnical characteristics	солома straw	отруби bran	скорлупа shell	опилки sawdust	ОЖКС waste from cattle	торф* peat*
Влажность W^a , % Humidity W^a , %	7,0	8,6	13,0	7,0	7,0	9,9
Зольность на сухую массу A^d , % Ash content on dry matter A^d , %	2,8	6,9	1,0	1,6	9,8	22,8
Выход летучих веществ V^{daf} , % Volatile substances V^{daf} , %	78,5	81,0	69,7	83,4	77,8	74,8
Теплота сгорания на сухую беззольную массу Q^{daf} , МДж/кг Calorific value for dry ashless mass Q^{daf} , MJ/kg	19,6	19,1	21,0	19,8	14,8	20,1
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг Net calorific value Q_i^r , MJ/kg	17,7	16,6	18,1	18,1	17,9	11,8
Элементный состав на сухую беззольную массу, % Elemental composition for dry ashless mass, %						
C^{daf}	50,20	49,14	51,81	52,5	47,87	52,06
H^{daf}	6,36	6,66	6,39	6,58	6,16	6,31
N^{daf}	1,09	3,30	0,24	0,22	1,94	3,58
S^{daf}	следы	0,07	следы	следы	0,25	0,20
O^{daf}	42,35	40,83	41,56	40,70	43,78	37,85
H/C атом.	1,52	1,63	1,48	1,50	1,54	1,45

Примечание: * – результаты элементного состава топлива приведены с учетом содержащегося в топливе диоксида углерода карбонатов $(CO_2)^d=9,82$ % [58].

Note: * – the results of fuel elemental composition are given taking into account carbon dioxide carbonates $(CO_2)^d=9,82$ % [58].

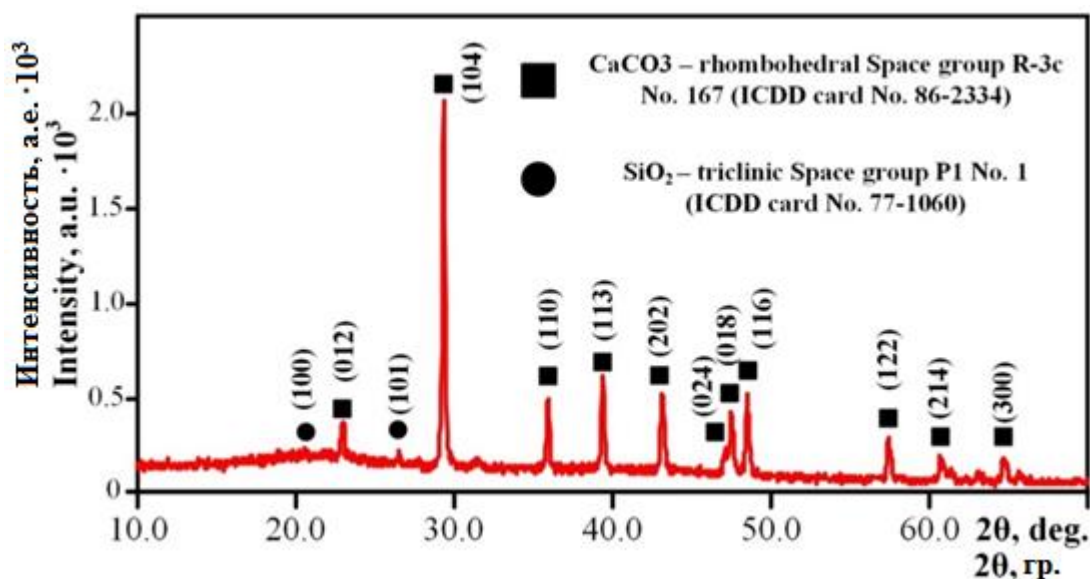


Рис. 1. Дифрактограмма рентгеноструктурного анализа суховского торфа

Fig. 1. X-ray diffraction pattern of Sukhovskiy peat

Дифференциальный термический анализ

На рис. 2 приведены результаты термогравиметрического анализа биомассы в интервале 313–1273 К. Видно, что в интервале температур 313–423 К происходит испарение влаги, содержащийся в образцах биомассы, после чего образцы нагреваются без изменения массы до температуры 463–488 К (в зависимости от вида биомассы). При этих температурах наблюдается начало первой стадии термического разложения биомассы, продолжающейся до 623–653 К и характеризующейся резким снижением массы образцов от 24 (торф) до 63 % (опилки). Согласно литературным данным [59] этот температурный интервал разложения характерен для целлюлозы и гемицеллюлозы, содержащихся в большом количестве в биомас-

се: содержание целлюлозы в биомассе может достигать 56 %, гемицеллюлозы – 35 % [60–65].

В интервале температур от 623–653 до 873 К наблюдается вторая (заключительная) стадия разложения биомассы, характеризующаяся значительно меньшим по сравнению с первой стадией изменением массы – от 9 до 14 %. Дальнейшее увеличение температуры приводит лишь к незначительному изменению массы образцов. Исключение составляет суховской торф: в интервале температуры 923–1123 К его масса уменьшается ещё на 18 %. Однако это изменение, по-видимому, обусловлено разложением карбоната кальция CaCO_3 на CaO и CO_2 , что подтверждается данными по изучению его термического разложения [66].

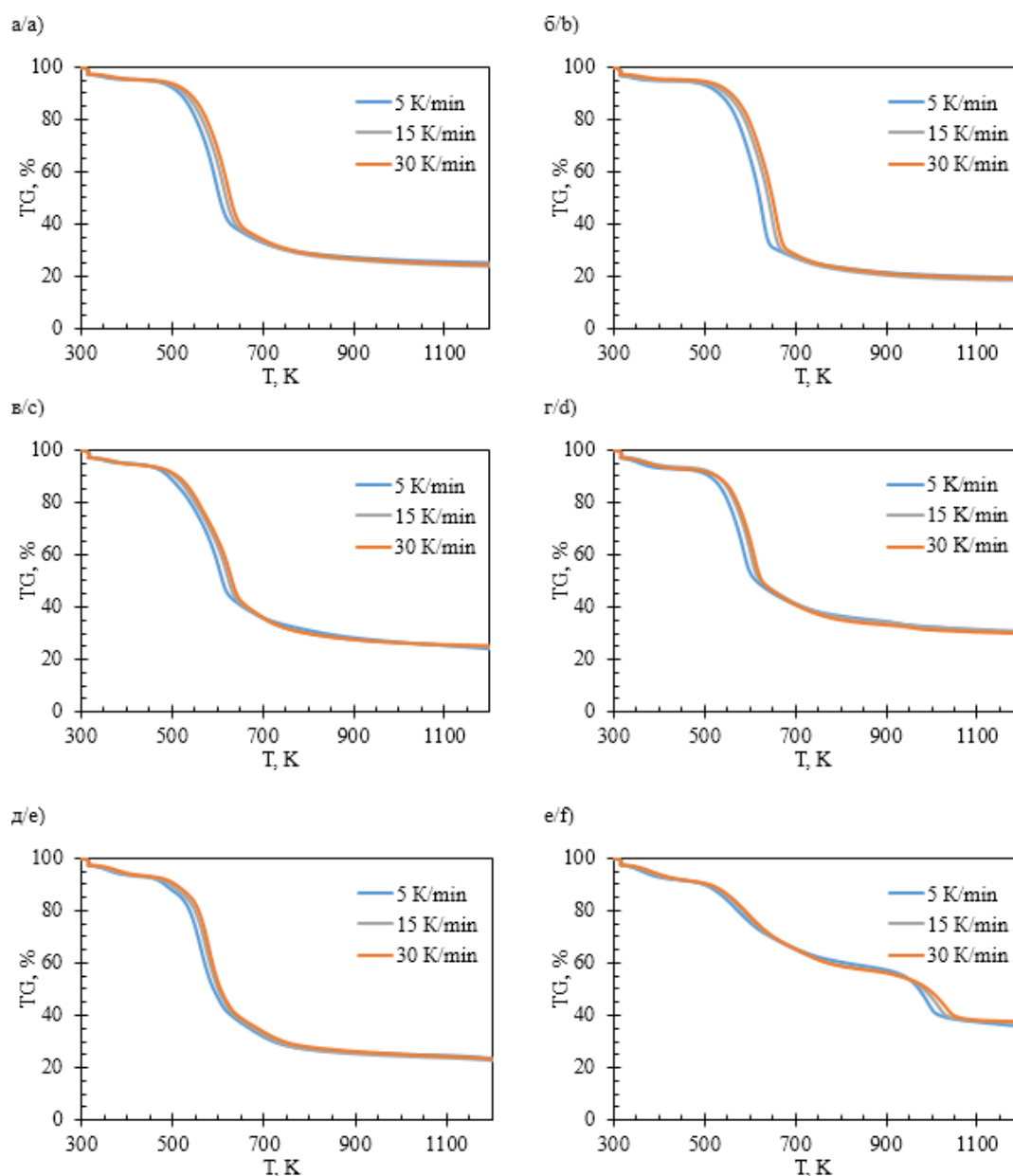


Рис. 2. Кривые термогравиметрического анализа (TG – thermogravimetric analysis) биомассы при скорости нагрева 5–30 К/мин: а) солома; б) опилки; в) скорлупа; г) ОЖКС; д) отруби; е) торф

Fig. 2. Thermogravimetric analysis (TG) curves of biomass at a speed of 5–30 K/min: а) straw; б) sawdust; в) shell; д) waste from cattle; е) bran; ф) peat

Стоит отметить, что увеличение скорости нагрева от 5 до 30 К в минуту не оказывает существенного воздействия на результаты ТГ, однако влияет на скорость изменения массы (дифференциальный термogravиметрический анализ – ДТГ) в зависимости от температуры нагрева (рис. 3). Видно, что скорость изменения массы прямо пропорциональна скорости

нагрева: увеличение скорости нагрева с 5 до 30 К/мин. привело к росту ДТГ в 6 раз.

Как видно из рис. 3, максимальная скорость разложения для соломы наблюдается при 613 К, для опилок – при 643 К, для скорлупы – при 613 К, для ОЖКС – при 598 К, для отрубей – при 573 К, для торфа – при 583 К.

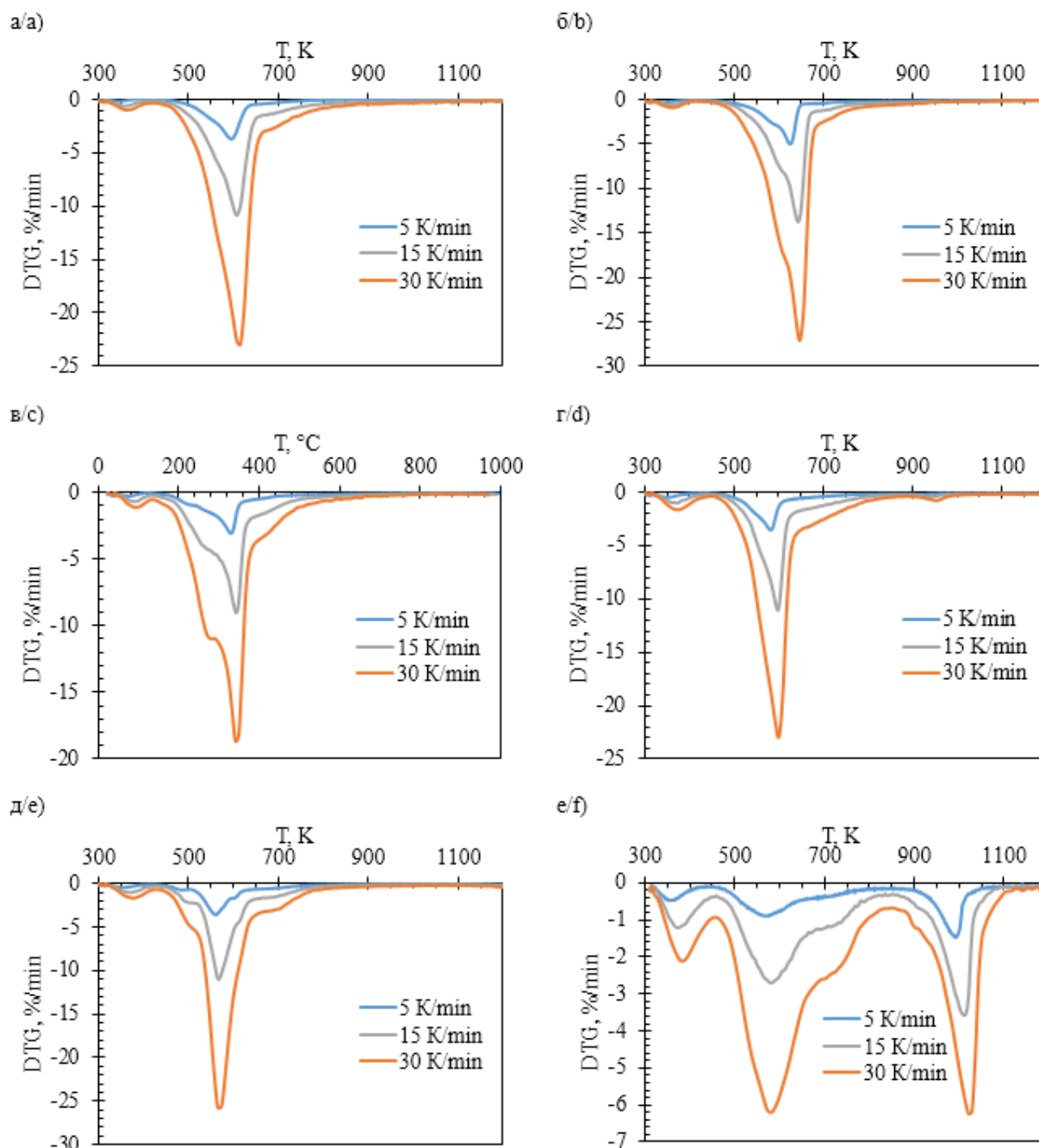


Рис. 3. Кривые ДТГ биомассы при скорости нагрева 5–30 К/мин: а) солома; б) опилки; в) скорлупа; г) ОЖКС; д) отруби; е) торф

Fig. 3. Differential thermogravimetric analysis (DTG) curves of biomass at heating rate of 5–30 K/min: a) straw; b) sawdust; c) shell; d) waste from cattle; e) bran; f) peat

Результаты ДСК (рис. 4) показывают, что разложение всех исследованных проб в диапазоне температур от 463–488 до 873 К сопровождается преимущественно экзотермическими реакциями, связанными с

разложением основных компонентов биомассы (гемиллюлозы, целлюлозы, лигнина и др.). Это подтверждается ранее проведенными исследованиями различных авторов [67–69].

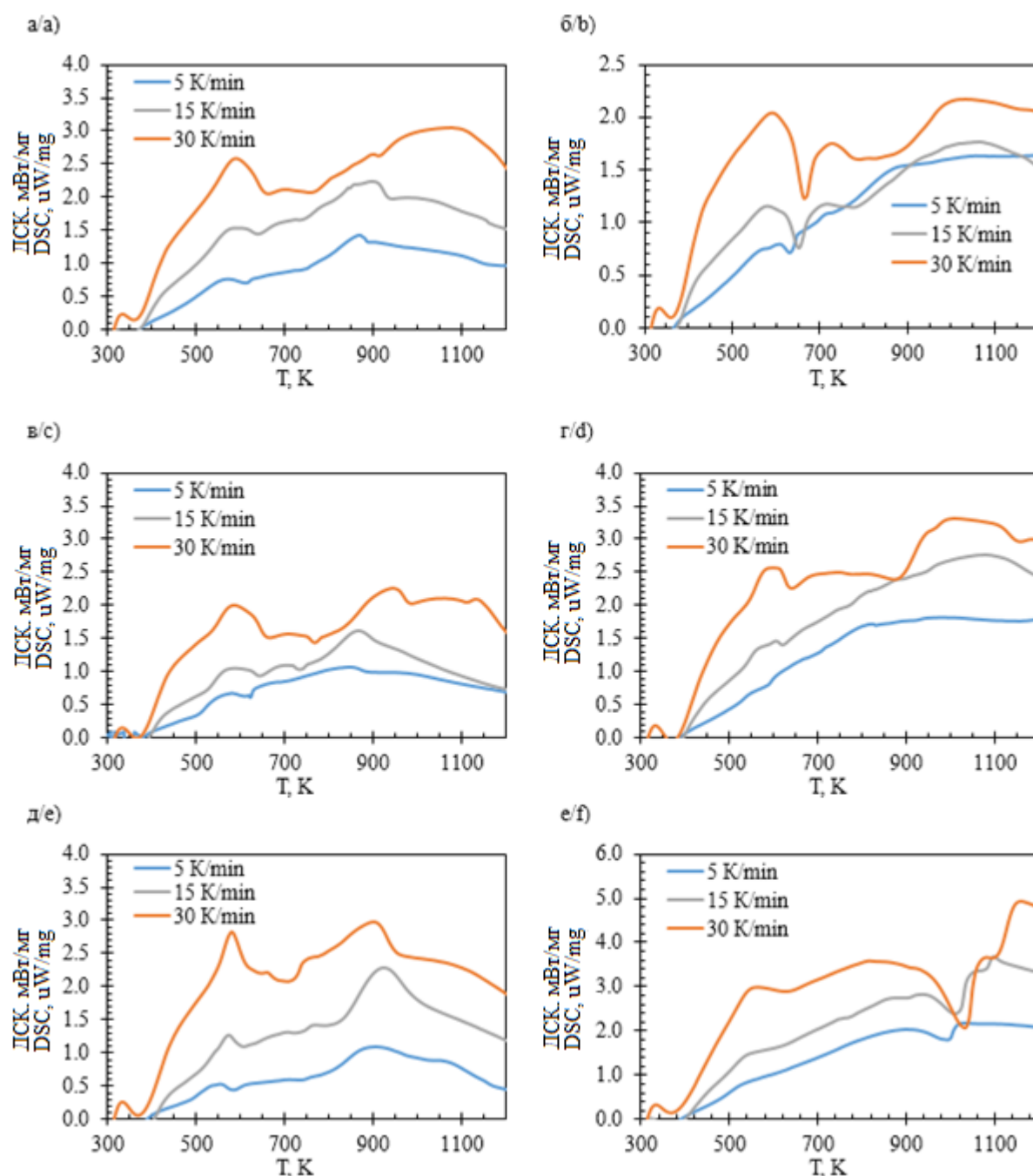


Рис. 4. Кривые ДСК биомассы при скорости нагрева 5–30 К/мин: а) солома; б) опилки; в) скорлупа; г) ОЖКС; д) отруби; е) торф

Fig. 4. Differential scanning calorimetry (DSC) curves of biomass at a heating rate of 5–30 K/min: a) straw; b) sawdust; c) shell; d) waste from cattle; e) bran; f) peat

Кинетика термического разложения

По результатам ТГ для трех скоростей нагрева (рис. 2) согласно (3) построены графики зависимости ($\ln((-1/w_0)(dw/dt))$) от ($1/T$) (рис. 5). Значения степени конверсии (w/w_0) выбраны для каждого вида топлива индивидуально в зависимости от результатов ТГ. Шаг изменения (w/w_0) принят равным 0,05.

Значения E_a и ($\ln[Af(w/w_0)]$) для каждой пробы биомассы приведены на рис. 6 для всех рассматриваемых диапазонов степени конверсии (w/w_0). Полученные зависимости E_a и ($\ln[Af(w/w_0)]$) применитель-

но к каждому конкретному образцу имеют идентичный вид, что, согласно [39], свидетельствует о корректности выполненного расчета. Средние значения энергии активации для рассмотренных интервалов (w/w_0) составляют: для соломы ($E_{a_{cp}}^{co}$) – 21,4 кДж моль⁻¹; для опилок ($E_{a_{cp}}^{op}$) – 20,7 кДж моль⁻¹; для скорлупы ($E_{a_{cp}}^{sk}$) – 23,8 кДж моль⁻¹; для ОЖКС ($E_{a_{cp}}^{oj}$) – 23,1 кДж моль⁻¹; для отрубей ($E_{a_{cp}}^{ot}$) – 31,5 кДж моль⁻¹; для торфа ($E_{a_{cp}}^{tr}$) – 24,0 кДж моль⁻¹.

Из рис. 6 можно заключить, что, несмотря на близкий состав исследуемых проб биомассы (табл. 1), их

термическое разложение протекает по различному механизму химических реакций (зависимость (E_a) от (w/w_0) имеет разный профиль для каждого вида биомассы). Можно отметить, что наибольшее значение $(E_a)=73 \text{ кДж моль}^{-1}$ наблюдается для отрубей при $(w/w_0)=0,46$, что соответствует 630 К – температура разложения целлюлозы [59]; второй пик – при температуре разложения гемицеллюлозы (555 К). При близких температурах (600–613 К) проявляется пик значений (E_a) у соломы, опилок и ОЖКС. Можно прийти к выводу, что наибольшие значения энергии активации при пиролизе биомассы характерны для температур, при которых происходит разложение основных её компонентов (гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина).

При сравнении полученных значений с данными других авторов, производивших расчет энергии активи-

зации различными методами [42–45], можно отметить, что (E_a) термического разложения биомассы Томской области имеет меньшие значения.

Согласно методике [39] на основе полученных результатов определен предэкспоненциальный множитель A и порядок реакции n , значения которых представлены в табл. 2. Видно, что полученное значение n для реакций, происходящих при пиролизе биомассы, имеет более низкое значение, чем этот же параметр для реакций термического разложения отдельных её компонентов (целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) [42]. Это можно объяснить более сложным механизмом разложения, обусловленным большим количеством одновременно протекающих реакций, оказывающих влияние друг на друга.

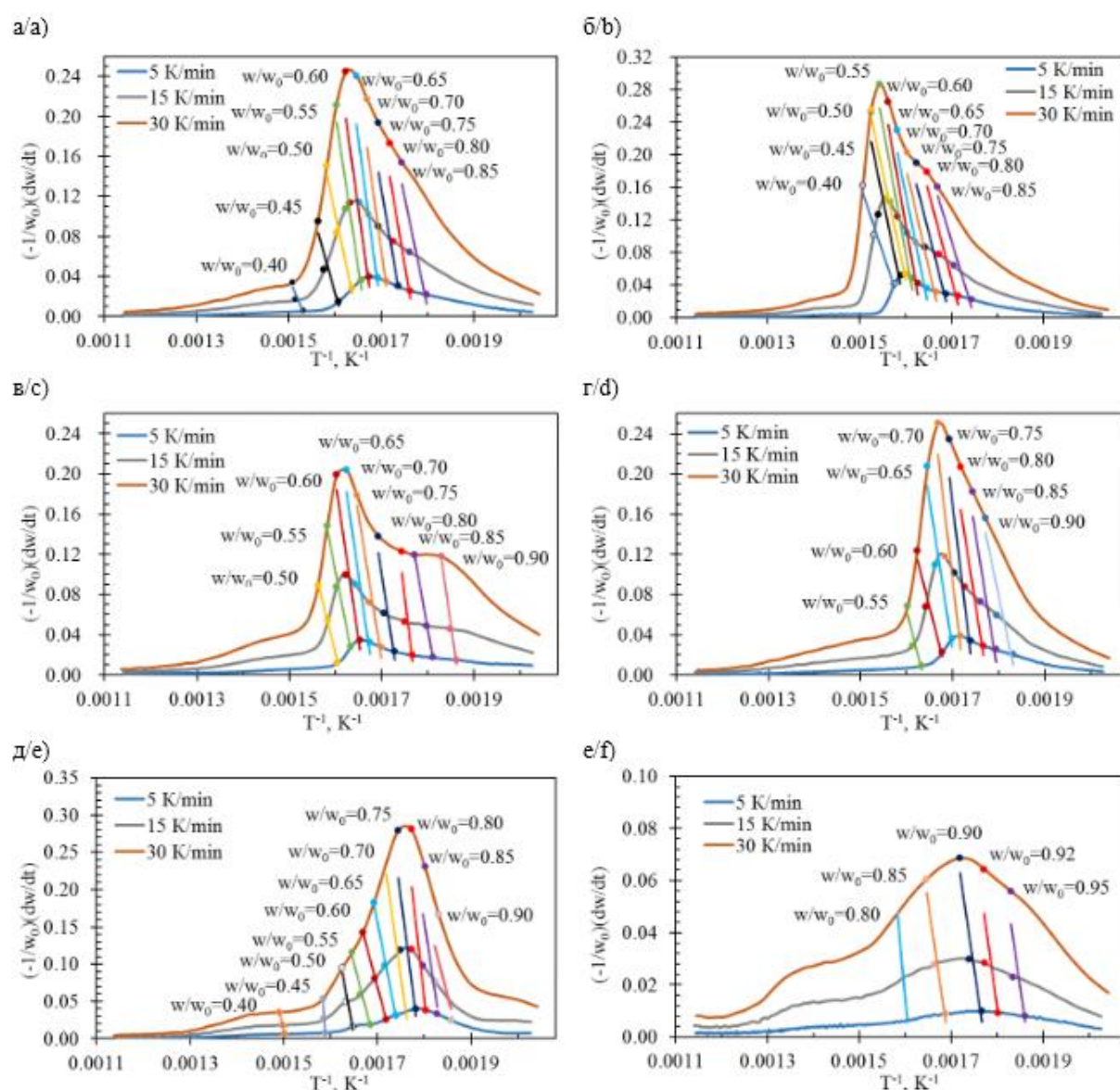


Рис. 5. Кривые зависимости $(\ln((-1/w_0)(dw/dt)))$ от $(1/T)$ для различных видов биомассы: а) солома; б) опилки; в) скорлупа; г) ОЖКС; д) отруби; е) торф

Fig. 5. Curves of dependence of $(\ln((-1/w_0)(dw/dt)))$ on $(1/T)$ for various types of biomass: а) straw; б) sawdust; в) shell; д) waste from cattle; е) bran; ф) peat

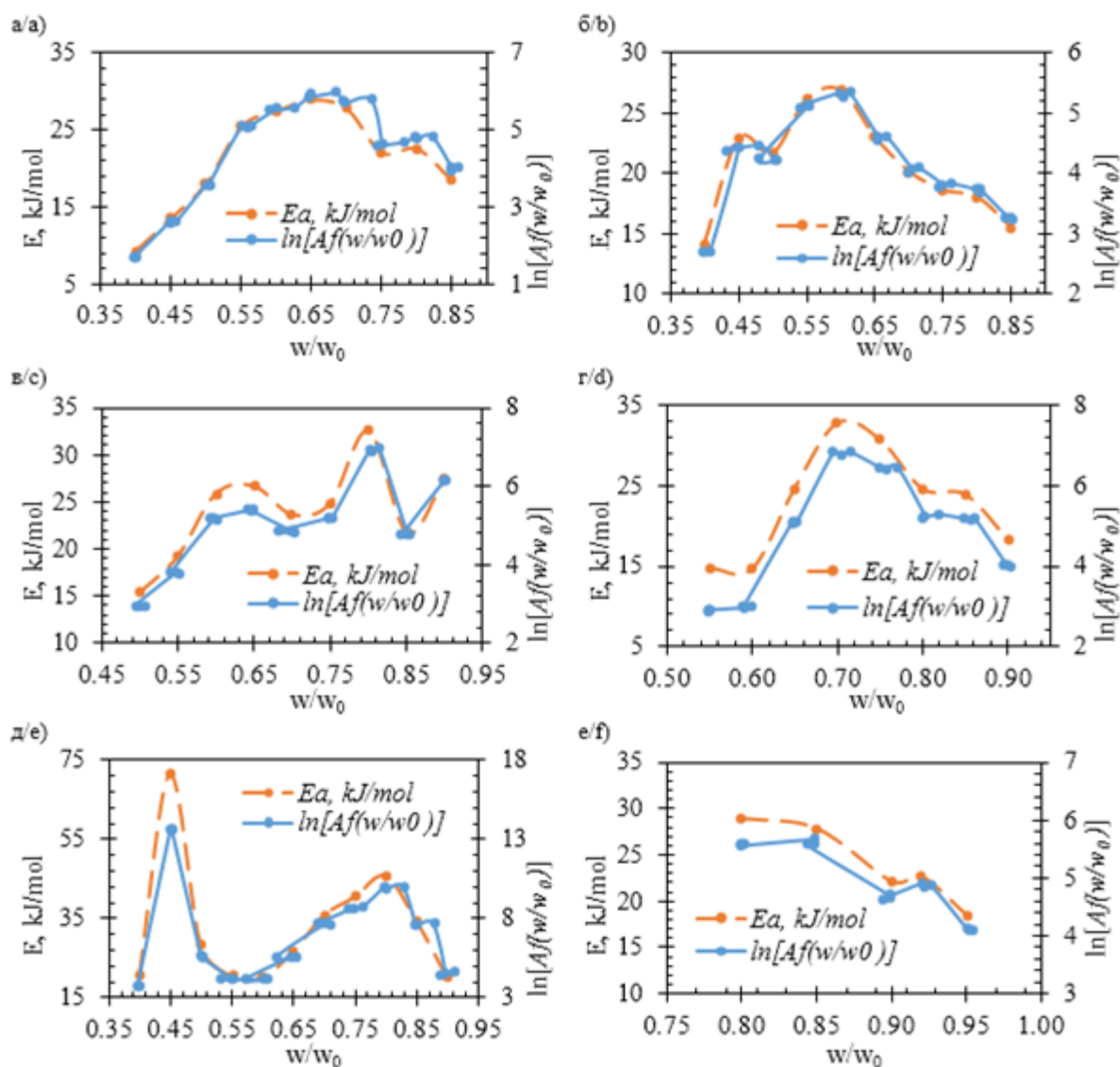


Рис. 6. Зависимость энергии активации E_a и $\ln[Af(w/w_0)]$ от степени конверсии биомассы в процессе пиролиза: а) солома; б) опилки; в) скорлупа; г) ОЖКС; д) отруби; е) торф

Fig. 6. Dependence of the activation energy E_a and $\ln[Af(w/w_0)]$ on biomass conversion degree during pyrolysis: а) straw; б) sawdust; в) shell; д) waste from cattle; е) bran; ф) peat

Таблица 2. Значения предэкспоненциального множителя и порядка реакции при пиролизе фракций

Table 2. Values of the pre-exponential factor and reaction order during fraction pyrolysis

Показатель/Indicator	Биомасса/Biomass					
	солома straw	отруби bran	скорлупа shell	опилки sawdust	ОЖКС waste from cattle	торф peat
Предэкспоненциальный множитель A , $ч^{-1}$ Pre-exponential factor A , h^{-1}	123,95	82,42	277,44	208,62	2377,01	664,88
Порядок реакции n Reaction order n	0,39	0,28	0,62	0,47	0,80	1,05

Заключение

Дифференциальный термический анализ биомассы показал, что ее термическое разложение в интервале 313–1273 К происходит в две стадии: первая стадия протекает в интервале температур от 463–488 до 623–653 К и характеризуется резким снижением массы образцов от 24 (торф) до 63 % (опилки); вторая стадия наблюдается от 623–653 до 873 К со значительно меньшим изменением массы образцов (от 9 до 14 %). При дальнейшем увеличении температуры ор-

ганическая часть образцов практически не претерпевала преобразования, изменения происходили только в минеральной части торфа при температуре 923–1123 К и были связаны с разложением карбоната кальция. Отмечено, что увеличение скорости нагрева от 5 до 30 К в минуту не оказывает существенного воздействия на результаты ТГ, однако влияет на скорость изменения массы (ДТГ) в зависимости от температуры нагрева: увеличение скорости нагрева с 5 до 30 К/мин привело к росту ДТГ в 6 раз.

На основе данных ТГ методом Фридмана произведен расчет кинетики термического разложения биомассы. Определены зависимости энергии активации (E_a) от степени конверсии биомассы (w/w_0), по которым рассчитаны её средние значения: для соломы ($E_{a_{cp}}^{co}$) – 21,4 кДж моль⁻¹; для опилок ($E_{a_{cp}}^{op}$) – 20,7 кДж моль⁻¹; для скорлупы ($E_{a_{cp}}^{ck}$) – 24,2 кДж моль⁻¹; для ОЖКС ($E_{a_{cp}}^n$) – 23,1 кДж моль⁻¹; для отрубей ($E_{a_{cp}}^{ot}$) – 33,1 кДж моль⁻¹; для торфа ($E_{a_{cp}}^T$) – 24,0 кДж моль⁻¹. Отмечено, что наибольшие значения энергии активации при пиролизе биомассы

характерны для температур, при которых происходит разложение основных её компонентов (гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00085). Исследование теплотехнических характеристик и минеральной части биомассы проведено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-38-90148). Аналитические измерения реализованы на приборной базе ПТВ в рамках государственного задания «Наука» (проект № FSWW-2020-0022).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World energy outlook special report 2016: energy and air pollution. – Washington: International Energy Agency Publ., 2016. – 9 p.
2. Drivers of stagnating global carbon intensity of electricity and the way forward / T. Goh, B.W. Ang, B. Su, H. Wang // *Energy Policy*. – 2018. – V. 113. – P. 149–156.
3. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale / J. Lelieveld, J.S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer // *Nature*. – 2015. – V. 525. – P. 367–371.
4. Cohen J.E. Human population: the next half century // *Science*. – 2003. – V. 302 (5648). – P. 1172–1175.
5. Lutz W., Sanderson W., Scherbov S. The coming acceleration of global population ageing // *Nature*. – 2008. – V. 451 (7179). – P. 716–719.
6. Bongaarts J. Human population growth and the demographic transition // *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*. – 2009. – V. 364. – P. 2985–2990.
7. Poumanyvong P., Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis // *Ecological Economics*. – 2010. – V. 70. – P. 434–444.
8. Lund H., Mathiesen B.V. Energy system analysis of 100 % renewable energy systems – the case of Denmark in years 2030 and 2050 // *Energy*. – 2009. – V. 34 (5). – P. 524–531.
9. Assessment of China's renewable energy contribution during the 12th Five Year Plan / L. Hong, N. Zhou, D. Fridley, C. Raczkowski // *Energy Policy*. – 2013. – V. 62. – P. 1533–1543.
10. Kabak M., Dagdeviren M. Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – V. 79. – P. 25–33.
11. Zero carbon energy system of South East Europe in 2050 / D.F. Dominkovic, I. Bacekovic, B. Cosic, G. Krajacic, T. Puksec, N. Duic, N. Markovska // *Applied Energy*. – 2016. – V. 184. – P. 1517–1528.
12. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – V. 39. – P. 748–764.
13. Key world energy statistics. – Paris: International Energy Agency, 2018. – 51 p.
14. The first step towards a 100 % renewable energy-system for Ireland / D. Connolly, H. Lund, B. Mathiesen, M. Leahy // *Applied Energy*. – 2011. – V. 88 (2). – P. 502–507.
15. How to achieve a 100 % RES electricity supply for Portugal? / G. Krajacic, N. Duic, M.D. Carvalho, I. Graca // *Applied Energy*. – 2011. – V. 88 (2). – P. 508–517.
16. Deng Y.Y., Blok K., Leun K. Transition to a fully sustainable global energy system // *Energy Strategy Reviews*. – 2012. – V. 1. – P. 109–121.
17. Elliston B., MacGill I., Diesendorf M. Comparing least cost scenarios for 100 % renewable electricity with low emission fossil fuel scenarios in the Australian National Electricity Market // *Renewable Energy*. – 2014. – V. 66. – P. 196–204.
18. The reference forecast of the German energy transition – an outlook on electricity markets / A. Knaut, C. Tode, D. Lindenberg, R. Malischek, S. Paulus, J. Wagner // *Energy Policy*. – 2016. – V. 92. – P. 477–491.
19. Goldemberg J., Coelho J.T., Suani I. Traditional biomass vs. modern biomass // *Energy Policy*. – 2004. – V. 32 (6). – P. 711–714.
20. Edenhofer O. The IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. – New York: Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011. – 1076 p.
21. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass // *Bioresource Technology*. – 2002. – V. 83 (1). – P. 37–46.
22. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 / S.E. Page, F. Siegert, J.O. Rieley, H-D.V. Boehm, A. Jaya, S. Limin // *Nature*. – 2002. – V. 420. – P. 61–65.
23. Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland / C.A. Alves, C. Gonçalves, C.A. Pio, F. Mirante, A. Caseiro, L. Tarelho, M.C. Freitas, D.X. Viegas // *Atmospheric Environment*. – 2010. – V. 44 (25). – P. 3024–3033.
24. Interactions between climate, land use and vegetation fire occurrences in El Salvador / D. Armenteras, C. Gibbes, C.A. Vivacqua, J.S. Espinosa, W. Duleba, F. Goncalves, C. Castro // *Atmosphere*. – 2016. – V. 7 (2). – P. 26–41.
25. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009) / G.R. van Der Werf, J.T. Randerson, L. Giglio, G.J. Collatz, M. Mu, P.S. Kasibhatla, D.C. Morton, R.S. Defries, Y. Jin, T.T. van Leeuwen // *Atmos. Chem. Phys*. – 2010. – V. 10. – P. 11707–11735.
26. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview // *Fuel*. – 2015. – V. 158. – P. 330–350.
27. Проблемы транспортировки угольных концентратов в период отрицательных температур окружающей среды / А.Д. Учитель, М.В. Кормер, В.П. Лялюк, И.А. Ляхова, Е.О. Шмельцер, Ю.И. Вититнев // *Кокс и химия*. – 2013. – № 5. – С. 13–19.
28. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels / L. Carvalho, E. Wopienka, C. Pointner, J. Lundgren, V.K. Verma, W. Haslinger, C. Schmidl // *Applied Energy*. – 2013. – V. 104. – P. 286–296.
29. The effect of co-combustion of waste from flour milling and highly mineralized peat on sintering of the ash residue / R. Tabakaev, K. Ibraeva, V. Kan, Y. Dubinin, M. Rudmin, N. Yazykov, A. Zavorin // *Energy*. – 2020. – V. 196. – P. 117–157.
30. Sutcu H. Pyrolysis of peat: product yield and characterization // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2007. – V. 24. – P. 736–741.
31. Jiang J., Ma X. Experimental research of microwave pyrolysis about paper mill sludge // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – V. 31 (17–18). – P. 3897–3903.
32. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis / R. Tabakaev, I. Kanipa, A. Astafev, Y. Dubinin, N. Yazykov, A. Zavorin, V. Yakovlev // *Fuel*. – 2019. – V. 245. – P. 29–38.
33. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels / C. Kassargy, S. Awad, G. Burnens, K. Kahine, M. Tazerout // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. – 2017. – V. 127. – P. 31–37.
34. Stepwise pyrolysis of mixed plastics and paper for separation of oxygenated and hydrocarbon condensates / N. Sophonrat, L. Sandstrom, I.N. Zaini, W. Yang // *Appl. Energy*. – 2018. – V. 229. – P. 314–325.
35. Frank-Kamenetsky D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics. – New York: Plenum, 1969. – 574 p.
36. Helianthus tuberosus as a promising feedstock for bioenergy and chemicals appraised through pyrolysis, kinetics, and TG-FTIR-MS

- based study / M.A. Mehmood, M.S. Ahmad, Q. Liu, C-G. Liu, M.H. Tahir, A.A. Alokbi, N.I. Tarbiah, H.M. Alsufiani, M. Gull // *Energy Convers. Manage.* – 2019. – V. 194. – P. 37–45.
37. Долганова И.О. Развитие подхода к моделированию процессов нефтепереработки на примере алкилирования бензолаэтиленом // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* – 2011. – № 1 (1). – С. 64–70.
38. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data // *Nature.* – 1964. – V. 201. – P. 68–69.
39. Friedman H.L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry // *Application to a phenolic plastic.* – 1964. – V. 6C. – P. 183–195.
40. Model-free kinetic analysis of melamine-formaldehyde resin cure / A. Kandelbauer, G. Wuzella, A. Mahendran, I. Taudes, P. Widsten // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2009. – V. 109 (3). – P. 1–10.
41. Lu C., Song W., Lin W. Kinetics of biomass catalytic pyrolysis // *Biotechnology Advances* – 2009. – V. 27 (5). – P. 583–587.
42. Гюльмалиев А.М., Султангузин И.А., Федюхин А.В. Математическое моделирование процесса пиролиза биомассы для производства синтез-газа и кокса // *Химия твердого топлива.* – 2012. – № 3. – С. 25–29.
43. Заварухин С.Г., Стрельцов И.А., Яковлев В.А. Исследование пиролиза быстрорастущей травянистой биомассы в изотермических условиях // *Кинетика и катализ.* – 2011. – Т. 52. – № 4. – С. 510–516.
44. Kinetic modeling and optimization of parameters for biomass pyrolysis: A comparison of different lignocellulosic biomass / H. Mahmood, N. Ramzan, A. Shakeel, M. Moniruzzaman, T. Iqbal, M.A. Kazmi, M. Sulaiman // *Energy Sources. P. A: Recovery, utilization and environmental effects.* – 2019. – V. 41 (14). – P. 1690–1700.
45. Kinetic parameters for biomass under self-ignition conditions: low-temperature oxidation and pyrolysis / L. Schwarzer, Z. Sárossy, P.A. Jensen, P. Glarborg, O. Karlström, J.K. Holm, K. Dam-Johansen // *Energy and Fuels.* – 2019. – V. 33 (9). – P. 8606–8619.
46. Alakangas E., Valtanen J., Levlin J.-E. CEN technical specification for solid biofuels-Fuel specification and classes // *Biomass and Bioenergy.* – 2006. – V. 30 (11). – P. 908–914.
47. Емешев В.Г., Паровинчак М.С. Без привозной энергетики // *Нефтегазовая вертикаль.* – 2005. – № 17. – С. 63–65.
48. Приложение к Постановлению Государственной Думы Томской области от 28.02.2008 № 1008 «Энергетическая стратегия Томской области на период до 2020 года». – Томск: Государственная Дума Томской области, 2008. – 89 с.
49. Торфяные ресурсы Томской области и их использование / Л.И. Инишева, В.С. Архипов, С.Г. Маслов, Л.С. Михантьева. – Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения РАНХИ, 1995. – 88 с.
50. ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations / S. Vyazovkin, K. Chrissafis, M.L. Di Lorenzo, N. Koga, M. Pijolat, B. Roduit, N. Sbirrazzuoli, J.J. Suñol // *Thermochimica Acta.* – 2014. – V. 590. – P. 1–23.
51. Bercic G. The universality of Friedman's isoconversional analysis results in a model-less prediction of thermodegradation profiles // *Thermochimica Acta.* – 2017. – V. 650. – P. 1–7.
52. Font R., Garrido M.A. Friedman and n-reaction order methods applied to pine needles and polyurethane thermal decompositions // *Thermochimica Acta.* – 2018. – V. 660. – P. 124–133.
53. Naviilah P.R., Sharma P.K., Gopinath M. Combustion characteristics and kinetic parameter estimation of Lantana camera by thermogravimetric analysis // *Biofuels.* – 2019. – V. 10. – P. 365–372.
54. Izato Y.-I., Miyake A. Kinetic analysis of the thermal decomposition of liquid ammonium nitrate based on thermal analysis and detailed reaction simulations // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2018. – V. 134. – P. 813–823.
55. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion / S.V. Vassilev, C.G. Vassileva, Y. Song, W. Li, J. Feng // *Fuel.* – 2017. – V. 208. – P. 377–409.
56. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance / V.K. Verma, S. Bram, F. Delattin, P. Laha, I. Vandendael, A. Hubin, J. De Ruyck // *Applied Energy.* – 2012. – V. 90. – P. 17–23.
57. DIN plus pellets or EN plus pellets // *AzeusBiopellet Machines.* URL: <https://www.biopelletmachine.com/biopellet-making-guidance/wood-pellet-certification-standard.html> (дата обращения 25.02.2020).
58. Исследование характеристик и минерального состава торфа Томской области применительно к энергетическому использованию / К.Т. Ибраева, Ю.О. Манаев, Р.Б. Табакаев, Н.А. Языков, А.С. Заворин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 191–200.
59. Кузнецов Б.Н. Каталитическая химия растительной биомассы // *Соровский образовательный журнал.* – 1996. – № 12. – С. 47–55.
60. Mohan D., Pittman C.U. Jr., Steele P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review // *Energy and Fuels.* – 2006. – V. 20. – P. 848–889.
61. Simoneit B.R.T. Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion // *Applied Geochemistry.* – 2002. – V. 17. – P. 129–162.
62. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel / Y.L. Zhao, A. Dolat, Y. Steinberger, X. Wang, A. Osman, G.H. Xie // *Field Crops Research.* – 2009. – V. 111. – P. 55–64.
63. Сивенков А.Б. Влияние физико-химических характеристик древесины на ее пожарную опасность и эффективность огнезащиты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2015. – 49 с.
64. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: a review of sub- and supercritical water technologies / A.A. Peterson, F. Vogel, R.P. Lachance, M. Froling, M.J. Antal Jr., J.W. Tester // *Energy and Environmental Science.* – 2008. – V. 1. – P. 32–65.
65. Gronli M.G., Varhegyi G., Di Blasi C. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood // *Industrial and Engineering Chemistry Research.* – 2002. – V. 41. – P. 4201–4208.
66. Капаев Г.И. Физико-химические основы процесса термического разложения солей угольной кислоты: автореф. дис. ... канд. хим. наук. – М., 2009. – 20 с.
67. Exothermic events of nut shell and fruit stone pyrolysis / C.D. Blasi, A. Galgano, C. Branca // *ACS Sustainable Chemistry and Engineering.* – 2019. – V. 7. – P. 9035–9049.
68. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects / R.B. Tabakaev, A.V. Astafev, Y.V. Dubinin, N.A. Yazykov, A.S. Zavorin, V.A. Yakovlev // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry.* – 2018. – V. 134. – P. 1045–1057.
69. Chen X., Zhang H., Xiao R. Mobile autothermal pyrolysis system for local biomass conversion: process simulation and techno-economic analysis // *Energy and Fuels.* – 2018. – V. 32. – P. 4178–4188.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Табакеев Р.Б., кандидат технических наук, научный сотрудник научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Алтынбаева Д.Б., студент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ибраева К.Т., аспирант, инженер-исследователь научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Заворин А.С., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой – руководитель научно-образовательного центра И.Н. Бутакова на правах кафедры Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

KINETIC CHARACTERISTICS OF BIOMASS PYROLYSIS

Roman B. Tabakaev¹,
tabakaevRB@tpu.ru

Dariga B. Altynbaeva¹,
dba10@tpu.ru

Kanipa T. Ibraeva¹,
kti1@tpu.ru

Alexander S. Zavorin¹,
zavorin@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the study is caused by the tendency to increase the share of renewable energy in the fuel and energy balance to reduce the harmful effects on the environment.

The main aim is to determine the kinetic parameters of biomass pyrolysis by G. Friedman's method based on the results of differential thermal analysis.

Objects: straw, grain processing waste (wheat bran), cedar nutshell, pine sawdust, lowland peat of the Sukhovskoe field, as well as live-stock waste from cattle.

Methods. Thermotechnical characteristics of biomass samples are determined according to certified methods (GOST 11305-2013, GOST 11306-2013, GOST R 54186-2010, GOST R 56881-2016, GOST 32990-2014); values of the calorific value were determined using the ABK-1 calorimeter (RET, Russia) in accordance with GOST 147-2013 (ISO 1928-2009); elemental analysis of its organic part was carried out on a Vario Micro Cube (Elementar, Germany) device; the kinetic characteristics of low-temperature pyrolysis of biomass were determined by G. Friedman's method based on differential thermal analysis carried out at temperature of 313–1273 K at a heating rate of 5, 15 and 30 K/min.

Results. Thermal decomposition of biomass in the range of 313–1273 K occurs in two stages: the first stage proceeds in the temperature range from 463–488 to 623–653 K and is characterized by a sharp decrease in the mass of samples from 24 (peat) to 63 % (sawdust); the second stage is observed from 623–653 to 873 K with a significantly smaller change in the mass of the samples (from 9 to 14 %). With a further increase in temperature, the organic part of the samples practically did not undergo transformation, changes occurred only in the mineral part of peat at a temperature of 923–1123 K and were associated with the decomposition of calcium carbonate. The dependences of activation energy (E_a) on the degree of biomass conversion (w/w_0) were determined, according to which its average values were calculated: for straw ($E_{a_{cp}}^{st}$) – 21,4 kJ mol⁻¹; for sawdust ($E_{a_{cp}}^{sw}$) – 20,7 kJ mol⁻¹; for shell ($E_{a_{cp}}^{sh}$) – 24,2 kJ mol⁻¹; for livestock waste from cattle ($E_{a_{cp}}^{LW}$) – 23,1 kJ mol⁻¹; for bran ($E_{a_{cp}}^{br}$) – 33,1 kJ mol⁻¹; for peat ($E_{a_{cp}}^{pe}$) – 24,0 kJ mol⁻¹. The values of the pre-exponential factor (A) for the studied biomass species are in the range of 82,42–2377,01 h⁻¹.

Key words:

Biomass, thermal processing, differential thermal analysis, kinetics, Friedman's method.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-79-00085). The study of thermal characteristics and the mineral part of biomass was carried out with the support of the Russian Foundation for Basic Research (project no. 19-38-90148). Analytical measurements were implemented on the TPU instrument base within the framework of the state task «Science» (project no. FSWW-2020-0022).

REFERENCES

1. World energy outlook special report 2016: energy and air pollution. Washington, International Energy Agency, 2016. 9 p.
2. Goh T., Ang B.W., Su B., Wang H. Drivers of stagnating global carbon intensity of electricity and the way forward. *Energy Policy*, 2018, vol. 113, pp.149–156.
3. Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature*, 2015, vol. 525, pp. 367–371.
4. Cohen J.E. Human population: the next half century. *Science*, 2003, vol. 302 (5648), pp. 1172–1175.
5. Lutz W., Sanderson W., Scherbov S. The coming acceleration of global population ageing. *Nature*, 2008, vol. 451 (7179), pp. 716–719.
6. Bongaarts J. Human population growth and the demographic transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, vol. 364, pp. 2985–2990.
7. Poumanyvong P., Kaneko S. Does urbanization lead to less energy use and lower CO₂ emissions? A cross-country analysis. *Ecological Economics*, 2010, vol. 70, pp. 434–444.
8. Lund H., Mathiesen B.V. Energy system analysis of 100 % renewable energy systems – the case of Denmark in years 2030 and 2050. *Energy*, 2009, vol. 34 (5), pp. 524–531.
9. Hong L., Zhou N., Fridley D., Raczkowski C. Assessment of China's renewable energy contribution during the 12th Five Year Plan. *Energy Policy*, 2013, vol. 62, pp. 1533–1543.
10. Kabak M., Dagdeviren M. Prioritization of renewable energy sources for Turkey by using a hybrid MCDM methodology. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 79, pp. 25–33.
11. Dominkovic D.F., Bacekovic I., Cosic B., Krajacic G., Puksec T., Duic N., Markovska N. Zero carbon energy system of South East Europe in 2050. *Applied Energy*, 2016, vol. 184, pp. 1517–1528.
12. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling tech-

- nology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39, pp. 748–764.
13. *Key world energy statistics*. Paris, International Energy Agency, 2018. 51 p.
 14. Connolly D., Lund H., Mathiesen B., Leahy M. The first step towards a 100 % renewable energy-system for Ireland. *Applied Energy*, 2011, vol. 88 (2), pp. 502–507.
 15. Krajacic I., Duic G., Carvalho N., Graca M.D. How to achieve a 100 % RES electricity supply for Portugal? *Applied Energy*, 2011, vol. 88 (2), pp. 508–517.
 16. Deng Y.Y., Blok K., Leun K. Transition to a fully sustainable global energy system. *Energy Strategy Reviews*, 2012, vol. 1, pp. 109–121.
 17. Elliston B., MacGill I., Diesendorf M. Comparing least cost scenarios for 100 % renewable electricity with low emission fossil fuel scenarios in the Australian National Electricity Market. *Renewable Energy*, 2014, vol. 66, pp. 196–204.
 18. Knaut A., Tode C., Lindenberg D., Malischek R., Paulus S., Wagner J. The reference forecast of the German energy transition – an outlook on electricity markets. *Energy Policy*, 2016, vol. 92, pp. 477–491.
 19. Goldemberg J., Coelho J. T., Suani I. Traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, 2004, vol. 32 (6), pp. 711–714.
 20. Edenhofer O. *The IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation*. New York, Cambridge University Press, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011. 1076 p.
 21. McKendry P. Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresour. Technology*, 2002, vol. 83 (1), pp. 37–46.
 22. Page S.E., Siebert F., Rieley J.O., Boehm H.-D.V., Jaya A., Limin S. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997. *Nature*, 2002, vol. 420, pp. 61–65.
 23. Alves C.A., Gonçalves C., Pio C.A., Mirante F., Caseiro A., Tarelho L., Freitas M.C., Viegas D.X. Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland. *Atmospheric Environment*, 2010, vol. 44 (25), pp. 3024–3033.
 24. Armenteras D., Gibbes C., Vivacqua C.A., Espinosa J.S., Duleba W., Goncalves F., Castro C. Interactions between climate, land use and vegetation fire occurrences in El Salvador. *Atmosphere*, 2016, vol. 7 (2), pp. 26–41.
 25. Van Der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Mu M., Kasibhatla P.S., Morton D.C., Defries R.S., Jin Y., Van Leeuwen T.T. Global fire emissions and the contribution of deforestation, savanna, forest, agricultural, and peat fires (1997–2009). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, vol. 10, pp. 11707–11735.
 26. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Vassilev V.S. Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: an overview. *Fuel*, 2015, vol. 158, pp. 330–350.
 27. Uchitel A.D., Kormer M.V., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Shmeltser E.O., Vititnev Y.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures. *Coke and Chemistry*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 13–19. In Rus.
 28. Carvalho L., Wopienka E., Pointner C., Lundgren J., Verma V.K., Haslinger W., Schmidl C. Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 2013, vol. 104, pp. 286–296.
 29. Tabakaev R., Ibraeva K., Kan V., Dubinin Y., Rudmin M., Yazykov N., Zavorin A. The effect of co-combustion of waste from flour milling and highly mineralized peat on sintering of the ash residue. *Energy*, 2020, vol. 196, pp. 117–157.
 30. Sutcu H. Pyrolysis of peat: product yield and characterization. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2007, vol. 24, pp. 736–741.
 31. Jiang J., Ma X. Experimental research of microwave pyrolysis about paper mill sludge. *Applied Thermal Engineering*, 2011, vol. 31 (17–18), pp. 3897–3903.
 32. Tabakaev R., Kanipa I., Astafev A., Dubinin Y., Yazykov N., Zavorin A., Yakovlev V. Thermal enrichment of different types of biomass by low-temperature pyrolysis. *Fuel*, 2019, vol. 245, pp. 29–38.
 33. Kassargy C., Awad S., Burnens G., Kahine K., Tazerout M. Experimental study of catalytic pyrolysis of polyethylene and polypropylene over USY zeolite and separation to gasoline and diesel-like fuels. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 127, pp. 31–37.
 34. Sophonrat N., Sandstrom L., Zaini I.N., Yang W. Stepwise pyrolysis of mixed plastics and paper for separation of oxygenated and hydrocarbon condensates. *Applied Energy*, 2018, vol. 229, pp. 314–325.
 35. Frank-Kamenetsky D.A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. New York, Plenum Publ., 1969. 574 p.
 36. Mehmood M.A., Ahmad M.S., Liu Q., Liu C.-G., Tahir M.H., Aloqbi A.A., Tarbiah N.I., Alsufiani H.M., Gull M. Helianthus tuberosus as a promising feedstock for bioenergy and chemicals appraised through pyrolysis, kinetics, and TG-FTIR-MS based study. *Energy Conversion Management*, 2019, vol. 194, pp. 37–45.
 37. Dolganova I.O. Razvitie podkhoda k modelirovaniyu protsessov neftepererabotki na primere alkilirovaniya benzolaetilenom [Development of an approach to the modeling of oil refining processes by the example of benzene alkylation with ethylene]. *Izvestiya vyzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*, 2011, no. 1 (1), pp. 64–70.
 38. Coats A.W., Redfern J.P. Kinetic parameters from thermogravimetric data. *Nature*, 1964, vol. 201, pp. 68–69.
 39. Friedman H.L. Kinetics of thermal degradation of char-forming plastics from thermogravimetry. *Application to a phenolic plastic*, 1964, vol. 6C, pp. 183–195.
 40. Kandelbauer A., Wuzella G., Mahendran A., Taudes I., Widsten P. Model-free kinetic analysis of melamine-formaldehyde resin cure. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, vol. 109 (3), pp. 1–10.
 41. Lu C., Song W., Lin W. Kinetics of biomass catalytic pyrolysis. *Biotechnology Advances*, 2009, vol. 27 (5), pp. 583–587.
 42. Gulmaliev A.M., Sultanguzin I.A., Fedukhin A.V. Matematicheskoe modelirovanie protsessov piroliza biomassy dlya proizvodstva sintez-gaza i koksa [Mathematical modeling of the biomass pyrolysis process for the production of synthesis gas and coke]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2012, no. 3, pp. 25–29.
 43. Zavarukhin S.G., Streltsov I.A., Yakovlev V.A. Issledovanie piroliza bystrorastushchey travyanistoy biomassy v izotermicheskikh usloviyakh [The study of pyrolysis of fast-growing grassy biomass in isothermal conditions]. *Kinetika i kataliz*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 510–516.
 44. Mahmood H., Ramzan N., Shakeel A., Moniruzzaman M., Iqbal T., Kazmi M.A., Sulaiman M. Kinetic modeling and optimization of parameters for biomass pyrolysis: A comparison of different lignocellulosic biomass. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 2019, vol. 41 (14), pp. 1690–1700.
 45. Schwarzer L., Sárossy Z., Jensen P.A., Glarborg P., Karlström O., Holm J.K., Dam-Johansen K. Kinetic Parameters for Biomass under Self-Ignition Conditions: Low-Temperature Oxidation and Pyrolysis. *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33 (9), pp. 8606–8619.
 46. Alakangas E., Valtanen J., Levlin J.-E. CEN technical specification for solid biofuels-Fuel specification and classes. *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 30 (11), pp. 908–914.
 47. Emeshev V.G., Parovinchak M.S. Bez privoznoy energetiki [No imported energy]. *Neftegazovaya vertikal*, 2005, no. 17, pp. 63–65.
 48. *Prilozhenie k Postanovleniyu Gosudarstvennoy Dumy Tomskoy oblasti ot 28.02.2008 no. 1008 «Energeticheskaya strategiya Tomskoy oblasti na period do 2020 goda»* [Appendix to the Resolution of the State Duma of the Tomsk Region dated 02.28.2008 No. 1008 «Energy Strategy of the Tomsk Region for the Period Until 2020»]. Tomsk, The State Duma of the Tomsk Region, 2008. 89 p.
 49. Inisheva L.I., Arkhipov V.S., Maslov S.G., Mikhanteva L.S. *Torfyaney resursy Tomskoy oblasti i ikh ispolzovanie* [Peat resources of the Tomsk region and their use]. Novosibirsk, RASHN SB Publ., 1995. 88 p.
 50. Vyazovkin S., Chrissafis K., Di Lorenzo M.L., Koga N., Pijolat M., Roduit B., Sbirrazzuoli N., Suñol J.J. ICTAC Kinetics Committee recommendations for collecting experimental thermal analysis data for kinetic computations. *ThermochimicaActa*, 2014, vol. 590, pp. 1–23.
 51. Bercic G. The universality of Friedman's isoconversional analysis results in a model-less prediction of thermodegradation profiles. *ThermochimicaActa*, 2017, vol. 650, pp. 1–7.
 52. Font R., Garrido M.A. Friedman and n-reaction order methods applied to pine needles and polyurethane thermal decompositions. *ThermochimicaActa*, 2018, vol. 660, pp. 124–133.
 53. Haviilah P.R., Sharma P.K., Gopinath M. Combustion characteristics and kinetic parameter estimation of Lantana camara by thermogravimetric analysis. *Biofuels*, 2019, vol. 10, pp. 365–372.

54. Izato Y.-I., Miyake A. Kinetic analysis of the thermal decomposition of liquid ammonium nitrate based on thermal analysis and detailed reaction simulations. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, vol. 134, pp. 813–823.
55. Vassilev S.V., Vassileva C.G., Song Y., Li W., Feng J. Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel*, 2017, vol. 208, pp. 377–409.
56. Verma V.K., Bram S., Delattin F., Laha P., Vandendael I., Hubin A., De Ruyck J. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance. *Applied Energy*, 2012, vol. 90, pp. 17–23.
57. *DINplus pellets or ENplus pellets*. Available at: <https://www.biopelletmachine.com/biopellet-making-guidance/wood-pellet-certification-standard.html> (accessed 25 February 2020).
58. Ibraeva K.T., Manaev U.O., Tabakaev R.B., Yazikov N.A., Zavorin A.S. Research of characteristics and mineral composition of peat of the Tomsk region relating to energy use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 191–200. In Rus.
59. Kuznetsov B.N. Kataliticheskaya khimiya rastitel'noy biomassy [Catalytic chemistry of plant biomass]. *Sorovskiy obrazovatel'ny zhurnal*, 1996, no. 12, pp. 47–55.
60. Mohan D., Pittman Jr. C.U., Steele P.H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy and Fuels*, 2006, vol. 20, pp. 848–889.
61. Simoneit B.R.T. Biomass burning – a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, pp. 129–162.
62. Zhao Y.L., Dolat A., Steinberger Y., Wang X., Osman A., Xie G.H. Biomass yield and changes in chemical composition of sweet sorghum cultivars grown for biofuel. *Field Crops Research*, 2009, vol. 111, pp. 55–64.
63. Sivenkov A.B. *Vliyanie fiziko-khimicheskikh kharakteristik dreviny na ee pozharuyu opasnost i effektivnost ognезashchity*. Avtoreferat Dokt. Dis. [Influence wood physicochemical characteristics on its fire hazard and fire protection effectiveness. Dr. Diss. Abstract]. Moscow, 2015. 49 p.
64. Peterson A.A., Vogel F., Lachance R.P., Froling M., Antal Jr. M.J., Tester J.W. Thermochemical biofuel production in hydrothermal media: A review of sub- and supercritical water technologies. *Energy and Environmental Science*, 2008, vol. 1, pp. 32–65.
65. Gronli M.G., Varhegyi G., Di Blasi C. Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2002, vol. 41, pp. 4201–4208.
66. Kapaev G.I. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessa termicheskogo razlozheniya soley ugol'noy kisloty*. Avtoreferat Kand. Dis. [Physicochemical basis of thermal decomposition of carbonic acid salts. Cand. Diss. Abstract]. Moscow, 2009. 20 p.
67. Blasi C.D., Galgano A., Branca C. Exothermic events of nut shell and fruit stone pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2019, vol. 7, pp. 9035–9049.
68. Tabakaev R.B., Astafev A.V., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Zavorin A.S., Yakovlev V.A. Autothermal pyrolysis of biomass due to intrinsic thermal decomposition effects. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, vol. 134, pp. 1045–1057.
69. Chen X., Zhang H., Xiao R. Mobile autothermal pyrolysis system for local biomass conversion: process simulation and techno-economic analysis. *Energy and Fuels*, 2018, vol. 32, pp. 4178–4188.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dariga B. Altynbaeva, student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kanipa T. Ibraeva, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Alexander S. Zavorin, Dr. Sc., professor, head of the department National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК624.139.22:69.059.2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЕЛЫХ ПОРОД ПРИ ПОДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКЕ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Галкин Александр Фёдорович¹,
afgalkin@yandex.ru

Курта Иван Валентинович²,
ivankurta@yandex.ru

Панков Владимир Юрьевич³,
pankov1956@inbox.ru

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
Россия, 677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36.

² Ухтинский государственный технический университет,
Россия, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13.

³ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова,
Россия, 677000, г. Якутск, ул. Белинского, 58.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью освоения природных ресурсов и расширения селитебных зон арктических регионов Российской Федерации. Развитие данных территорий криолитозоны осложняется негативным влиянием криогенных процессов на строительство и эксплуатацию линейных инженерных сооружений, в частности, на подземную прокладку кабельных линий связи.

Цель: обосновать и разработать новую технологию подземной прокладки кабельных линий связи, минимизирующую влияние негативных криогенных процессов, в частности, морозобойного растрескивания грунтов, на надежность эксплуатации, без существенного увеличения трудоемкости процесса укладки кабелей на магистральных и селитебных участках.

Объекты: магистральные и селитебные участки подземных кабельных линий связи в период строительства и эксплуатации.

Методы: аналитические расчеты температурного режима мерзлых грунтов с целью выбора оптимальной концентрации водного раствора этиленгликоля для создания искусственной охранной грунтовой зоны вокруг кабеля; лабораторные исследования горелых пород Кильдямского месторождения для оценки целесообразности их использования в качестве защитной породной зоны вокруг кабеля.

Результаты. Проанализированы основные особенности технологий подземной укладки кабелей в деятельном слое многолетнемёрзлых грунтов. Показано, что основным фактором, негативно влияющим на надежность кабельной связи, является образование морозобойных трещин в деятельном слое грунта в осенний период, которое приводит к повреждению оболочки, а зачастую и к полному разрушению кабеля и необходимости его замены на больших участках. Рассмотрены и проанализированы основные способы борьбы с морозобойным растрескиванием грунтов, которые рекомендуются ведомственными инструкциями для снижения влияния морозобойного растрескивания грунтов на надежность эксплуатации линий связи при подземной прокладке кабелей. Установлено, что применяемые способы либо малоэффективны, либо экономически затратны. Предложена новая технология подземной прокладки, повышающая надежность эксплуатации кабельных линий связи при подземной прокладке на участках морозобойного (криогенного) растрескивания грунтов. Суть новой технологии состоит в том, что во время укладки кабеля часть естественного грунта деятельного слоя заменяется породой с высокими гидрофильными свойствами (например, используют горелые породы), которую предварительно или прямо в траншее пропитывают незамерзающей жидкостью, например, раствором этиленгликоля с концентрацией, обеспечивающей тапое состояние грунта на заданной глубине. Получена формула, которая позволяет выбрать необходимое для достижения цели содержание этиленгликоля в водном растворе, в зависимости от глубины траншеи для укладки кабеля. Преимущество предлагаемой технологии по сравнению с используемыми в настоящее время заключается в возможности защищать не только кабели, проложенные в селитебных зонах, но и большие магистральные участки кабельных линий связи, проходящие через зоны морозобойного растрескивания грунтов. Результаты экспериментальных исследований на опытном участке прокладки кабеля показали достаточную степень надежности предлагаемой технологии. В течение пяти лет наблюдений на опытном участке поврежденный кабель не было, хотя морозобойные трещины появлялись в осенне-зимний период регулярно.

Ключевые слова:

Горелая порода, защита, кабель, мерзлый грунт, криосфера, морозобойные трещины, надежность, способ, этиленгликоль.

Введение

Защита инженерных сооружений от криогенных воздействий является актуальной проблемой для криолитозоны. Такие криогенные явления и процессы, как прогрессирующее оттаивание пород, солифлюкция, кавернообразование, пучение грунтов, морозобойное растрескивание грунтов, существенно ослож-

няют строительство и эксплуатацию инженерных объектов как наземного, так и подземного размещения [1–5]. Особое место занимают подземные линейные сооружения: газо- и нефтепроводы, силовые кабели, кабели связи, поскольку относятся к важным хозяйственным объектам, обеспечивающим надежное функционирование других стратегически и экономи-

чески важных промышленных предприятий. Исследованиям и разработке методов и способов защиты подземных линейных сооружений от криогенных воздействий уделяется достаточно большое внимание в научном и инженерном сообществах [6–13]. Наиболее широко применяющимися способами траншейной укладки кабелей в деятельном слое мерзлых грунтов являются способы, рекомендованные нормативными документами Минсвязи РФ [14, 15]. Согласно рекомендациям, непосредственная защита кабеля должна осуществляться частичной заменой естественного грунта в траншее. А именно, предварительно, до и после укладки кабеля в траншею, в ней устраиваются нижний (постель) и верхний (засыпка) слои из песка, укрывающие кабель с двух сторон. Причем постель и засыпка делается толщиной не менее 0,1 м. Затем траншею засыпают вынутым ранее естественным грунтом. Предлагаемый способ укладки кабелей обладает рядом недостатков, которые снижают уровень надежности эксплуатации линий связи при наличии криогенных процессов. Наиболее существенным из них является увлажнение засыпки за счет проникания поверхностных вод в период дождей и таяния снега. При увлажнении постели и засыпки, песчаные грунты которых обладают высокими фильтрационными характеристиками, и промерзании в осенний и зимний периоды происходит прочное смерзание кабеля с окружающим грунтом. При появлении на таком переувлажненном участке морозобойных трещин, глубина которых достигает нескольких метров, а ширина раскрытия у поверхности земли десятков сантиметров, ввиду того, что кабель не имеет возможности свободно перемещаться в грунте, происходят полные или частичные разрывы кабеля. Ведомственные инструкции и рекомендации по строительству и эксплуатации кабельных линий связи в деятельном слое криолитозоны рекомендуют в качестве защитной меры использовать дополнительную обмотку кабеля несколькими слоями полиэтиленовой пленки. При этом для повышения надежности между слоями пленки рекомендуется размещать незамерзающие смазки, например БМ-3, ЦИАТИМ-201, или другие аналогичные пластинчатые смазки [15]. Этот способ, как показывают результаты лабораторных и полевых испытаний, достаточно надежен, но трудоемок и сложен в практической реализации. Кроме того, он требует существенных трудовых и экономических затрат, особенно при прокладке на магистральных участках в полевых условиях, вне селитебных зон, где длина морозобойных участков грунтов измеряется километрами. Однако в пределах селитебных зон и для защиты муфтовых соединений, наиболее подверженных негативному влиянию криогенных процессов, данный способ достаточно эффективен и надежен.

Подобная технология защиты муфтовых соединений с использованием незамерзающих смазок, являющаяся более рациональной, состоит в том, что обрабатывается не сама муфта и небольшая часть прилегающего к ней кабеля, а окружающий их грунт. В частности, засыпной грунт, который непосредственно прилегает к муфте, смешивают в равных объемах с

пластинчатой смазкой (например, незамерзающей смазкой типа БМ-3). Затем муфту укрывают этой смесью плотным слоем на 4–5 см со всех сторон. В дальнейшем траншею засыпают ранее вынутым разрыхленным грунтом и при необходимости трамбуют. Это значительно удешевляет технологию и снижает в целом трудоемкость процесса укладки кабеля. Но, к сожалению, использовать данный способ невозможно при прокладке кабелей на магистральных участках вне селитебных зон.

Целью настоящей работы являлось обоснование и разработка новой экономичной технологии прокладки кабелей в деятельном слое криолитозоны, на участках подверженных морозобойному (криогенному) растрескиванию. Основная идея состоит в том, что в традиционной технологии укладки кабеля, рекомендованной ведомственными нормативными инструкциями, часть естественного грунта деятельного слоя заменяется породой с высокими гидрофильными свойствами (например, используют горелые породы), которую предварительно или прямо в траншее пропитывают незамерзающей жидкостью, например раствором этиленгликоля с концентрацией, обеспечивающей талое состояние грунта на заданной глубине [16].

Метод. Для успешной реализации технологии на практике необходимо обеспечить талое состояние горелых пород, пропитанных незамерзающей жидкостью, в течение всего зимнего периода. Поэтому главным расчетным показателем для достижения цели является процентное содержание этиленгликоля в водном растворе. Содержание этиленгликоля должно быть равно или выше такого значения, чтобы минимальная температура пород в осенне-зимний период года на дне котлована (траншеи) $T(h)$ была равна или выше температуры замерзания водного раствора насыщающей жидкости T , то есть выполнялось условие $T \leq T(h)$.

Были проведены специальные лабораторные исследования, в результате которых установлено, что зависимость между процентным содержанием этиленгликоля в водном растворе (Π) и температурой (T , °C), при которой водный раствор не замерзает, имеет простой линейный вид:

$$\Pi = |2,0 - 1,6 \cdot T|, \quad (1)$$

где 1,6(%/°C) и 2,0(%) – коэффициенты, полученные из опыта.

Ожидаемую температуру грунта на дне траншеи (котлована) в самый холодный период года можно определить по известной в инженерном мерзлотоведении зависимости [17]:

$$T(h) = t_0 - A_0 \exp(-D), \quad (2)$$

$$D = h \sqrt{\pi / a \tau_0}, \quad (3)$$

где t_0 – средняя годовая температура воздуха, °C; t_n – температура воздуха в период самой холодной пятидневки в году, °C; $A_0 = \text{abs}(t_0 - t_n)$ – амплитуда средних значений температуры, °C; h – глубина траншеи (котлована), м; a – температуропроводность засыпного грунта, м²/ч.; τ_0 – период от середины июля до начала самой холодной пятидневки в году, ч.

Входящие в формулы значения параметров (t_n) и (t_0) для конкретной местности можно найти на специальных сайтах погоды, например гисметео, или взять из справочника [18].

Объединяя зависимости (1)–(3), несложно получить формулу для нахождения оптимального процентного содержания этиленгликоля в водном растворе, которое обеспечит круглогодичное талое состояние грунтовой постели и засыпки на заданной глубине:

$$\Pi \geq 1,6[-t_0 + (t_0 - t_n) \exp(-D)] - 2. \quad (4)$$

Обсуждение. По формуле (4) были проведены многовариантные расчеты, которые представлены в виде 3D графика на рисунке.

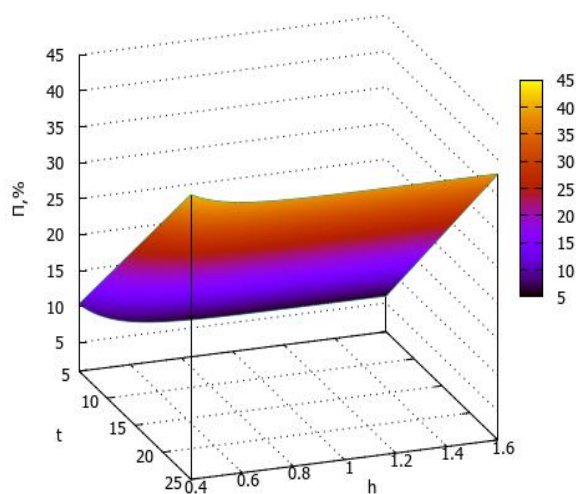


Рисунок. Оптимальная концентрация водного раствора этиленгликоля в зависимости от глубины прокладки кабеля

Figure. Optimal concentration of aqueous solution of ethylene glycol depending on cabling depth

Из графика на рисунке видно, что основным определяющим параметром является средняя зимняя температура воздуха в районе строительства линейных сооружений связи. Глубина траншеи влияет на конечный результат только в диапазоне 0,4–0,7 м, т. е. при неглубоком заложении кабеля. Это объясняется тепловой инерционностью мерзлого грунтового массива, деятельный слой которого в криолитозоне иногда не превышает одного метра [19, 20].

Для примера и пояснения сущности новой технологии рассмотрим укладку кабеля в деятельном слое дисперсного мерзлого грунта, подверженного криогенному процессу с образованием морозобойных трещин. Возьмём в качестве исходных характерные для условий криолитозоны данные: $t_0 = -10,4$ °C; $t_n = -55$ °C; $\tau_0 = 4320$ ч; $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м²/ч; $h = 1,20$ м. Используя формулу (4), найдём, что необходимое для достижения цели содержание этиленгликоля в водном растворе должно составлять около 20 %. В качестве засыпки можно использовать любые гидрофильные горные породы, обладающие развитой капиллярной структурой, например алевролиты, туфы, известняки и т.п. В то же время наш практический опыт показы-

вает, что наиболее рациональным (с технологической и экономической точки зрения) является использование природных глиежей (глины естественно жёные). Иногда их определяют как горелые породы или горелики. Отдельные разновидности этих пород являются гидрофильными и обладают хорошо развитой капиллярной структурой. Лабораторные исследования отдельных видов горелых пород показали, что их водонасыщение в насыщенном состоянии по объёму достигает 40% и более (были исследованы легкие глиежи из Кильдямского месторождения, расположенного в центральном районе РС(Я)). На практике новая технология укладки кабеля была реализована на опытном участке, где постоянно происходили аварии с разрывом кабеля вследствие морозобойного растрескивания грунта. На дне траншеи (глубина 1,2 м) была сделана постель из горелых пород толщиной приблизительно 10 см. Потом в траншею укладывался кабель, и производилась засыпка траншеи (на такую же толщину) слоем горелых пород. Затем методом прямого полива непосредственно в траншею пропитывали горелые породы подготовленным заранее незамерзающим водным раствором с 20%-м содержанием этиленгликоля. Степень влагонасыщения горелых пород фиксировалась визуально: до появления слоя жидкости на поверхности горелых пород. Предварительно выполненные лабораторные исследования показали, что скорость капиллярного всасывания горелыми породами водного раствора этиленгликоля достаточно высокая при любой концентрации раствора и не должна влиять на технологичность процесса на практике при проведении строительных работ. Это подтвердилось при проведении натурного эксперимента на опытном участке. На увлажнённый слой горелых пород засыпали естественный грунт, вынутый при подготовке траншеи, который после укладки послойно уплотняли с помощью вибратора. В отдельных местах опытного участка, где ожидалось большие водопитоки в летнее время, между породным слоем глиежей и грунтом прокладывалась полиэтиленовая пленка. Наблюдения, которые проводились в течение пяти лет, показали, что, несмотря на появление глубоких морозобойных трещин (глубиной до 2 м с шириной раскрытия до 10 см), повреждений кабеля не было. Механизм защиты подземных кабельных линий от криогенных воздействий реализуется следующим образом. За счет того, что вокруг кабеля образуется зона незамерзающих пород, смерзания кабеля с грунтовой постелью и засыпкой не происходит. Это обеспечивает отсутствие растягивающих напряжений на поверхности кабеля при прохождении морозобойной трещины и, соответственно, его полную сохранность. По сравнению с традиционно применяемыми на практике способами защиты кабелей при траншейной прокладке в криолитозоне данная технология более надежна и экономична. Прежде всего, это обусловлено низкой, по сравнению с ценой рекомендуемых смазок, стоимостью этиленгликоля. Оценка показала, что стоимость смазок почти на порядок выше стоимости чистого этиленгликоля. Учитывая, что смазки рекомендуется использовать в соотношении один к

одному с грунтом, а достаточная для достижения цели концентрация этиленгликоля не превышает 25 %, экономическая эффективность предлагаемой технологии становится очевидной. Важным элементом новой технологии является то, что, как показали результаты специальных лабораторных исследований, раствор этиленгликоля достаточно надежно «закрепляется» в порах и капиллярах горелых пород и не «вымывается» с течением времени, даже после возможных фазовых превращений. То есть технологию можно считать экологически чистой и использовать как в селитебных зонах, так и полевых районах.

Заключение

Проанализированы основные особенности технологий подземной укладки кабелей в деятельном слое многолетнемёрзлых грунтов. Показано, что основным фактором, негативно влияющим на надежность кабельных линий связи, является образование морозобойных трещин в деятельном слое грунта в осенний период. Этот процесс приводит к повреждению оболочки, а зачастую и к полному разрушению кабеля и необходимости его замены на больших участках. Рассмотрены и проанализированы основные способы борьбы с морозобойным растрескиванием грунтов, которые рекомендуются ведомственными инструкциями для снижения влияния морозобойного растрескивания грунтов на надежность эксплуатации линий связи при подземной прокладке кабелей. Установлено, что применяемые способы либо малоэффективны, либо экономически затратны. Предложена новая технология,

повышающая надежность эксплуатации кабельных линий связи при подземной прокладке на участках морозобойного (криогенного) растрескивания грунтов. Суть новой технологии состоит в том, что во время укладки кабеля часть естественного грунта деятельного слоя заменяется породой с высокими гидрофильными свойствами (например, используют глиежи), которую предварительно или прямо в траншее пропитывают незамерзающей жидкостью, например, раствором этиленгликоля с концентрацией, обеспечивающей талое состояние грунта на заданной глубине. Это предотвращает смерзание кабеля с засыпным грунтом и предохраняет его от негативного воздействия криогенных процессов, в частности морозобойных трещин. Получена формула, которая позволяет выбрать необходимое для достижения цели содержание этиленгликоля в водном растворе в зависимости от глубины траншеи для укладки кабеля. Преимущество предлагаемой технологии, по сравнению с используемыми в настоящее время, заключается в возможности защищать не только кабели, проложенные в селитебных зонах, но и большие магистральные участки кабельных линий связи, проходящие через зоны морозобойного растрескивания грунтов. Результаты экспериментальных исследований на опытном участке прокладки кабеля показали достаточную степень надежности предлагаемой технологии. В течение пяти лет наблюдений на опытном участке повреждений кабеля не было, хотя морозобойные трещины появлялись в осенне-зимний период регулярно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions // *Oil Gas Storage Transportation*. – 2013. – № 6. – P. 365–369.
2. Николаева М.В., Стручкова Г.П. Прогнозирование теплового взаимодействия участка подземного трубопровода с льдистыми грунтами // *Технологии нефти и газа*. – 2018. – № 4 (117). – С. 56–60.
3. Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Расширение нефтепровода «Восточная Сибирь–Тихий океан» (геоэкологические и геотехнические аспекты) // *Маркшейдерия и недропользование*. – 2018. – № 5 (97). – С. 59–66.
4. Xu J., Goering D.J. Experimental validation of passive permafrost cooling systems // *Cold Regions Science and Technology*. – 2008. – № 53 (3). – P. 283–297.
5. Miller D.L., Johnson L. Pile settlement in saline permafrost: a case history // *Proc. 5th Canadian Permafrost Conference*. – Quebec, 1990. – P. 371–378.
6. Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Эколого-геокриологические и геотехнические условия газотранспортной системы «Сила Сибири» // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 189–200. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8
7. Железняк М.Н., Сериков С.И., Шац М.М. Газотранспортная система «Сила Сибири»: современные проблемы и перспективы // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2017. – № 4 (62). – С. 48–56.
8. Galkin A.F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – № 8. – P. 70–73.
9. Температурное взаимодействие подземного трубопровода с криолитозоной / Г.П. Стручкова, Т.А. Капитонова, М.В. Николаева, О.И. Слепцов // *Естественные и технические науки*. – 2017. – № 12 (114). – С. 125–128.
10. Guizhi Liu. Study of the method laying fiber optic cable in the same trench with pipeline in permafrost region // *Proceedings of the International Petroleum and Petrochemical Technology Conference*. – 2018. – P. 152–158. URL: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2173-3> (дата обращения 01.02.2020).
11. Tan J.D., Zheng J., Ma Y.B. Displacement monitoring of Mohe-Daqing oil pipeline in the permafrost frozen area // *Oil Gas Storage Transp.* – 2012. – № 5. – P. 737–739.
12. Gao P. Construction technical study of communication buried optical cable in plateau permafrost area of Qinghai-Tibet railway // *Railway Signal Communication*. – 2010. – № 3. – P. 52–53.
13. Zhang T. Study of influence on optical cable from perennial frozen soil // *Railway Signal Communication*. – 2005. – № 3. – P. 49–50.
14. Инструкция по проектированию линейно-кабельных сооружений связи. ВСН 116.93 – М.: Минсвязь России, 1993. – 26 с.
15. Технические указания по проектированию, строительству и эксплуатации кабельных линий связи в районах вечной мерзлоты. – М.: Минсвязь СССР, 1981. – 83 с.
16. Способ прокладки кабельных линий связи: патент Рос. Федерация. № 2110128, заявл. 24.10.1994; опубл. 27.04.1998. – Бюл. № 4. – 5 с.
17. Докучаев В.В. Расчет фундаментов на вечномерзлых грунтах по предельным состояниям. – Л.: Стройиздат, 1968. – 120 с.
18. Строительная климатология и геофизика / под ред. М.А. Кошкина. – М.: Стройиздат, 1973. – 320 с.
19. Ершов Э.Д. Общая геокриология. – М.: Изд-во Моск. ун-та. 2002. – 684 с.
20. Общее мерзлотоведение (геокриология) / под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: Изд-во Моск. ун-та. 1978. – 463 с.

Поступила 07.02.2020 г.

Информация об авторах

Галкин А.Ф., доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

Курта И.В., кандидат технических наук, доцент кафедры недропользования, строительства и менеджмента Ухтинского государственного технического университета.

Панков В.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

UDC 624.139.22:69.059.2

USE OF BURNED ROCKS IN UNDERGROUND LAYING OF CABLE LINES IN THE CRYOLITZONE

Aleksandr F. Galkin¹,
afgalkin@yandex.ru

Ivan V. Kurta²,
ivankurta@yandex.ru

Vladimir Yu. Pankov³,
pankov1956@inbox.ru

¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
36, Merzlotnaya street, Yakutsk, 677010, Russia.

² Ukhta State Technical University,
13, Pervomayskaya street, Ukhta, 169300, Russia.

³ North-Eastern Federal University,
58, Belinsky street, Yakutsk, 677000, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop natural resources and expand the residential areas of the arctic regions of the Russian Federation. The development of these territories in the permafrost zone is complicated by the negative influence of cryogenic processes on the construction and operation of linear engineering structures, in particular, on the underground laying of cable communication lines.

The main aim of the research is to substantiate and develop a new technology for underground laying of cable communication lines that minimizes the impact of negative cryogenic processes, in particular, frost cracking of soils, on the reliability of operation, without significant increase in complexity of laying cables on the main and residential areas.

Objects: trunk and residential sections of underground cable lines during construction and operation.

Methods: analytical calculations of the temperature regime of frozen soils in order to select the optimal concentration of an aqueous solution of ethylene glycol to create an artificial protective soil zone around the cable; laboratory studies of the slopes of the Kildyamskoe field to assess the feasibility of their use as a protective rock zone around the cable.

Results. The main features of laying cable communication lines in the permafrost zone are analyzed. It was established that the main factor negatively affecting the reliability of cable communication is cryogenic processes. In particular, frost cracking of the soil of the active layer, which leads to rupture of the cables. The main methods of combating frost cracking of soils to protect cables are reviewed and analyzed. It is established that the methods used are either ineffective or economically costly. A new technology of underground laying is proposed that increases the reliability of cable communication lines in the permafrost zone. The essence of the new technology is that during cable laying, a part of the natural soil is replaced with hydrophilic rock, which is pre-saturated preliminary or directly in the trench with an ice-free aqueous solution of ethylene glycol. A formula is obtained for the optimal concentration of an aqueous solution of ethylene glycol depending on the depth of the cable. The advantage of the proposed technology for underground cable laying is that it becomes possible to protect large linear sections of soil that are subjected to frost cracking.

Key words:

Burned rocks, protection, cable, frozen soil, cryosphere, frost cracks, reliability, method, ethylene glycol.

REFERENCES

1. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions. *Oil Gas Storage Transp.*, 2013, no. 6, pp.365–369.
2. Nikolaeva M.V., Struchkova G.P. Prediction of thermal interaction of an underground pipeline section with icy soils. *Oil and Gas Technologies*, 2018, no. 4 (117), pp. 56–60. In Rus.
3. Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shatz M.M. Expansion of the East Siberia – Pacific Ocean oil pipeline (geoecological and geotechnical aspects). *Mine Surveying and Subsoil Use*, 2018, no. 5 (97), pp. 59–66. In Rus.
4. Xu J., Goering D.J. Experimental validation of passive permafrost cooling systems. *Cold Regions Science and Technology*, 2008, no. 53 (3), pp. 283–297.
5. Miller D.L., Johnson L. Pile settlement in saline permafrost: a case history. *Proc. 5th Canadian Permafrost Conference*. Quebec, 1990. pp. 371–378.
6. Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shatz M.M. Ecological, geocryological and geotechnical conditions of the Power of Siberia gas transmission system. *Bulletin of PNIPU. Geology. Oil and gas and mining*, 2018, vol. 17, no. 2, pp. 189–200. In Rus. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.2.8
7. Zheleznyak M.N., Serikov S.I., Shatz M.M. Gas transmission system «Power of Siberia»: current problems and prospects. *Pipeline transport: theory and practice*, 2017, no. 4 (62), pp. 48–56. In Rus.
8. Galkin A.F. Thermal conditions of the underground town collector tunnel. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no. 8, pp. 70–73.
9. Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Nikolaeva M.V., Sleptsov O.I. The temperature interaction of an underground pipeline with a permafrost zone. *Natural and Technical Sciences*, 2017, no. 12 (114), pp. 125–128. In Rus.
10. Guizhi Liu. Study of the method laying fiber optic cable in the same trench with pipeline in permafrost region. *Proc. of the International Petroleum and Petrochemical Technology Conference*, 2018, pp. 152–158. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2173-3> (accessed 1 February 2020).
11. Tan J.D., Zheng J., Ma Y.B. Displacement monitoring of Mohe-Daqing oil pipeline in the permafrost frozen area. *Oil Gas Storage Transportation*, 2012, no. 5, pp. 737–739.
12. Gao P. Construction technical study of communication buried optical cable in plateau permafrost area of Qinghai-Tibet railway. *Railway Signal Communication*, 2010, no. 3, pp. 52–53.
13. Zhang T. Study of influence on optical cable from perennial frozen soil. *Railway Signal Communication*, 2005, no. 3, pp. 49–50.

14. *Instruktsiya po proektirovaniyu lineynno-kabelnykh sooruzheniy svyazi. VSN 116.93* [Instructions for the design of linear-cable communication facilities]. Moscow, Minsvyaz Rossii Publ., 1993. 26 p.
15. *Tekhnicheskie ukazaniya po proektirovaniyu, stroitelstvu i ekspluatatsii kabelnykh liniysvyazi v rayonakh vechnoy merzloty* [Technical guidelines for the design, construction and operation of cable communication lines in permafrost areas]. Moscow, Minsvyaz SSSR Publ., 1981. 83p.
16. Galkin A.F., Li S.T., Aristarhov I.M., Volovik L.Yu. *Sposob prokladki kabelnykh liniy svyazi* [The method of laying cable communication lines]. Patent RF, no. 2110128, 1998.
17. Dokuchaev V.V. *Raschet fundamentov na vechnomerzlykh gruntakh po predelnym sostoyaniyam* [Calculation of foundations on permafrost soils according to limiting conditions]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1968. 120 p.
18. *Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Building climatology and geophysics]. Ed. by M.A. Koshkin. Moscow, Stroyizdat Publ., 1973. 320 p.
19. Ershov E.D. *Obshchaya geokriologiya* [General geocryology]. Moscow, MoscowUniversity Publ., 2002. 684 p.
20. *Obshchee merzlotovedenie (geokriologiya)* [General permafrost (geocryology)]. Ed. by V.A. Kudryavtsev. Moscow, Moscow University Publ., 1978. 463 p.

Received: 7 February 2020.

Information about the authors

Aleksandr F. Galkin, Dr. Sc., professor, chief researcher, Melnikov Permafrost Institute.

Ivan V. Kurta, Cand. Sc., associate professor, Ukhta State Technical University.

Vladimir Yu. Pankov, Cand. Sc., associate professor, North-Eastern Federal University.

УДК 662.24.06

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕАГЕНТОВ-ИНГИБИТОРОВ НАБУХАНИЯ ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Аверкина Елена Владимировна¹,
caverkina.l@yandex.ru

Шакирова Эльвира Венеровна¹,
viva160@mail.ru

Николаева Маргарита Борисовна²,
margaritanik97@mail.ru

Климова Аина Александровна¹,
cherdanceva94@yandex.ru

¹ Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

² Казанский федеральный университет,
Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

Актуальность. Подсолевой структурный комплекс месторождений Восточной Сибири включает в себя отложения ордовика, которые представлены преимущественно супесями, суглинками, глинами, алевролитами, мергелями и доломитами. Подсолевой комплекс состоит из аргиллитов, доломитов, известняков, а также их переслаивания. При бурении нефтяных скважин большое количество осложнений может вызвать набухание глинистых пород: прихват бурильного инструмента, кавернообразование, сальникообразование, расширение ствола скважины, потеря циркуляции и др. Буровой раствор должен обладать высокой ингибирующей способностью для максимального снижения интенсивности набухания. Этого свойства можно добиться специальными реагентами-ингибиторами, которые являются основным компонентом ингибирующего бурового раствора.

Цель: исследовать ингибирующую способность линейки реагентов, которые представляют композиции аминов, полиамидов и ряда других соединений.

Объект: буровой раствор, применяемый на месторождениях Восточной Сибири.

Методы. Для определения линейного набухания глины использовалась модель Linear Swellmeter OFITE, определяющая гидратирование или дегидратирование глин и глинистых пород путем измерения изменения линейных размеров образца из глины. Исследование по влиянию реагентов ингибиторов на реологические параметры бурового раствора проводилось с помощью традиционных методов.

Результаты и выводы. Установлено, что соли $MgCl^+6H_2O$ и $NaCl$, структурирующие молекулы воды, снижают набухание глинопорошка. Все исследуемые образцы ингибиторов в разной степени оказывают влияние на параметры бурового раствора, наиболее благоприятными для использования в пресном глинистом буровом растворе на основе бентонитовой немодифицированной глины оказались Ингидол Б и Ингидол Sil. Остальные образцы также могут успешно использоваться при дальнейшей обработке раствора для регулирования реологических параметров и показателя фильтрации после проведенных дополнительных исследований.

Ключевые слова:

Буровой раствор, ингибиторы, глинистые отложения, Восточная Сибирь, реологические свойства.

Введение

Поддержание устойчивости стенок ствола скважины при бурении – одна из главных задач, которую нужно решать в интервалах залегания глинистых пород. Анализ строительства скважин, а также результатов исследований по буровым растворам за последнее время показывает [1–4], что растет количество осложнений в виде осыпей, обвалов, сужений ствола скважины, а также увеличиваются затраты времени и средств на их ликвидацию (до 50 % аварийного времени) [5]. В этой связи одним из перспективных направлений успешного решения проблем строительства скважины тесно связано с совершенствованием технологии приготовления бурового раствора. Выбор типа, состава и свойств очистного агента для заданных горно-геологических условий (для бурения глинистых отложений) – задача комплексная, требующая научно обоснованного подхода.

Согласно имеющимся исследованиям [6–9] для сохранения устойчивости стенок ствола скважины при бурении в интервалах глинистых пород необходимо учитывать их состав, состояние и свойства, которые зависят от условий формирования и последующей историей развития. В этих условиях под влиянием внешних и внутренних факторов, в основном температуры и давления, формируются набухающие (пластичные) и ненабухающие (хрупкие) глинистые породы. Набухающие пластичные и водочувствительные глинистые породы ведут себя как высокопластичные тела, вызывают сужение ствола скважины и вываливаются. Ненабухающие хрупкие и пластично хрупкие способны растрескиваться и осыпаться в стволе скважины. Следовательно, прежде всего, необходимо классифицировать глинистые породы по характеру их разрушения [10] (табл. 1).

Таблица 1. Классификация глинистых пород по характеру разрушения

Table 1. Classification of clay rocks by the nature of destruction

Группа пород Rock group	Подгруппа пород Rock subgroup	Структурные контакты Structural contacts	Порода Rock	Характер разрушения в растворе Nature of destruction in solution
Скальные Rocky	Метаморфические Metamorphic	Фазовые Phase	Сланцы Shales	Очень хрупкий Very fragile
Полускальные Half	Осадочные Sedimentary	–	Аргиллиты, алевролиты Mudstones, siltstones	Хрупкий Fragile
Связные Connected		Смешанные – коагуляционные, переходные, фазовые Mixed – coagulation, transitional, phase	Супеси, суглинки, глины Sandy loam, loam, clay	Пластичный (высокопластичный) Plastic (high grade)

Из этого следует, что при выборе рецептуры бурового раствора необходимо учитывать особенности строения глинистых отложений.

Объект и методика исследования

В геологическом разрезе месторождений Восточной Сибири также встречаются глинистые породы. В состав надсолевого структурного комплекса включены отложения ордовика, которые представлены преимущественно супесями, суглинками, глинами, алевролитами, мергелями и доломитами. Глинистыми породами сложен и подсолевой комплекс, который состоит из аргиллитов, доломитов, известняков, а также их переслаивания.

Имеющийся производственный опыт бурения скважин на месторождениях Восточной Сибири показывает, что в большинстве случаев не удается предупредить нарушения устойчивости глинистых пород в околоствольном пространстве скважин [11]. Под влиянием фильтрата бурового раствора пластичные глинистые породы набухают, теряют устойчивость и переходят в буровой раствор, значительно ухудшая его качество.

Для бурения интервалов пластичных глин в основном применяются ингибирующие буровые растворы. Основное их назначение – снижение набухания и диспергации глин, минимизация влияния глинистого шлама на структурно-реологические и фильтрационные показатели раствора [12, 13].

На сегодняшний день отсутствует единый показатель оценки ингибирующей способности бурового раствора. В связи с этим, как показывает практика, ингибирующую способность характеризуют большим количеством различных показателей (увлажняющей способности, глиноемости, коллоидной фракции, наработки бурового раствора и т. д.) [14, 15]. На исследовании процесса гидратации по коэффициентам набухания, размокания и скорости увлажнения [16, 17] базируются существующие методы оценки характера взаимодействия буровых растворов с глинистой породой.

В настоящей статье представлены результаты сравнительных испытаний ингибирующих добавок, оказывающих влияние на выбор типа, состава и технологии получения бурового раствора [18].

Для выполнения поставленной задачи в учебно-исследовательской лаборатории буровых растворов и крепления скважин ИРНИТУ проведены лабораторные исследования ингибирующей способности линейки реагентов производителя НПК «Химпром», ко-

торые представляют композиции аминов, полиамидов и ряда других соединений. Характеристики реагентов приведены в табл. 2.

Все ингибиторы имеют 100 % растворимость в воде и рекомендуемую концентрацию к применению от 0,5 до 3 %.

В качестве эталонного образца глины был использован немодифицированный бентонитовый глинопорошок марки ПББ(АМ) производства ООО «Бентонит Кургана». Данный глинопорошок обладает хорошей способностью набухания и не содержит в своем составе активных компонентов. Параметры глинопорошка приведены в табл. 3.

Исследование проводилось с помощью модели для измерения линейного набухания глины Linear Swellmeter OFITE. Это прибор, используемый для определения гидратирования или дегидратирования глин и глинистых пород путем измерения изменения линейных размеров образца из глины либо реконструированного или цельного керна. Результаты испытания отображаются в виде графиков, которые показывают степень набухания в процентах от начального размера образца в зависимости от времени [19].

В измерении высоты образца за определённый промежуток времени заключается суть метода, а в основе исследований заложен процесс поглощения дисперсионной среды (жидкости) дисперсной фазой (образцом), сопровождаемый увеличением объема образца при продольном набухании.

Прибор оснащен автоматической электронной измерительной системой. Измерительный преобразователь линейных перемещений (Linear Variable Differential Transducer – LVDT) измеряет расширение пробы в вертикальном направлении с точностью до 0,1 %, и эта информация затем сохраняется как функция от времени через систему обработки информации. С помощью гидравлического компактора образцы неорганических пород спрессовывают в брикет для помещения его в ячейку и последующего исследования.

Четыре ячейки с измерительными головками позволяют одновременно проводить четыре испытания. Полученные данные обрабатываются программой, которая регистрирует изменения и выводит их на экран.

Для эксперимента в каждую ячейку помещался брикет из глинопорошка, спрессованный в гидравлическом компакторе OFITE при давлении 6000 psi, или 41 МПа, что соответствует сжатию породы на глубине около 3500 м. Далее в ячейку с брикетом заливалась исследуемая жидкость.

Таблица 2. Паспортные характеристики тестируемых ингибиторов

Table 2. Passport characteristics of the tested inhibitors

Название реагента Reagent name	Общее описание General description	Назначение Appointment	Внешний вид Appearance	t замерзания, °C freezing t , °C	pH, не менее pH, not less
Ингидол А Ingidol A	Концентрат амидов алифатического ряда со слабокатионными свойствами Aliphatic amide concentrate with low cationic properties	Ингибитор аргиллитов и алевролитов Inhibitor of mudstones and siltstones	Вязкая жидкость от темно-коричневого до черного цвета Dark brown to black viscous liquid	–8	6
Ингидол Б Ingidol B	Композиция природных амидов и полиэфиров с модифицирующими добавками Composition of natural amides and polyesters with modifying additives	Ингибирование набухания глинистых минералов Inhibition of clay mineral swelling	Вязкая жидкость темно-коричневого цвета Dark brown viscous liquid	–8	6
Terra Hib AM	Композиция на основе полиаминов, амидов и полиэфиров с модифицирующими добавками Composition based on polyamines, amides and polyesters with modifying additives	Ингибитор глин и глинистых сланцев Clay and shale inhibitor	Темно-коричневая жидкость Dark brown liquid	–15	6–9
Ингидол Sil Ingidol Sil	Композиция кремнийорганических соединений Composition of organosilicon compounds	Гидрофобизатор, регулятор реологических свойств Water repellent, regulator of rheological properties	Прозрачная или слегка мутная жидкость, от бесцветного до светло-коричневого цвета, допускается наличие мелкодисперсного осадка Clear or slightly cloudy liquid, from colorless to light brown in color, a fine precipitate is allowed	–	13–14
Ингидол ГГЛ Ingidol GGL	Композиция битума и производных, гильсонита, модифицированных жирных кислот Composition of bitumen and derivatives, gilsonite, modified fatty acids	Стабилизация нестабильных глин Stabilization of unstable clays	Однородная густая жидкость от темно-коричневого до черного цвета Homogeneous thick liquid from dark brown to black	–30	–
ГКЖ-11Н GKZH-11N	Концентрированный водный раствор метилсиликоната натрия Concentrated aqueous solution of sodium methylsiliconate	Модификатор глинистых буровых растворов Clay drilling fluid modifier	Жидкость от бесцветного до светло-коричневого цвета. Допускается наличие мелкодисперсного осадка и механических примесей Colorless to light brown liquid. Fine sediment and mechanical impurities are allowed	–	–

Таблица 3. Параметры глинопорошка ПББ (АМ)

Table 3. Parameters of PBB clay powder (AM)

№ Пробы Sample no.	Описание Description	Влага порошка, % Powder moisture, %	Выход глинистого раствора, м³/т Clay solution yield, m³/t	Мокрый ситовый анализ: остаток на сите с сеткой, % Wet sieve analysis: residue on a sieve with a mesh, %		Фильтрация, см³ Filtration, cm³
				№ 05	№ 0071	
219	Глинопорошок бентонитовый марки ПББ(АМ) Bentonite clay powder of grade PBB (AM)	11,4	17,0	0,00	1,00	13,2

На первом этапе приготавливались водные растворы ингибиторов в концентрации 0,5 %. Замер степени набухания брикета производился в течение 1–3 суток при постоянном перемешивании. Кривые набухания для каждого ингибитора приведены на рис. 1.

Результаты исследования и их обсуждение

На графике рис. 1 видно, что кривые набухания не стабилизировались – процесс гидратации не прекратился по истечении 2 суток. Однако уже можно сделать вывод об ингибирующей способности реагентов. Максимальную степень набухания показал образец в растворе TerraHib AM – 170 % от исходного размера брикета глинопорошка. Лучшую ингибирующую спо-

собность продемонстрировал Ингидол ГГЛ – 95 %, механизм ингибирования которого заключается в кольтации микротрещин асфальтенами. Также можно отметить и реагент Ингидол Б с близкими значениями расширения брикета 107 %. Максимальное снижение гидратации происходит за счет механизма ингибирования, который заключается в адсорбции полиаминов на глинистой макроповерхности. Находящиеся в водной фазе промывочной жидкости молекулы ингибитора не коагулируют коллоидную глинистую фазу, так как они электронейтральны.

Результаты линейного набухания брикетов глинопорошка в водных растворах ингибиторов приведены в табл. 4.

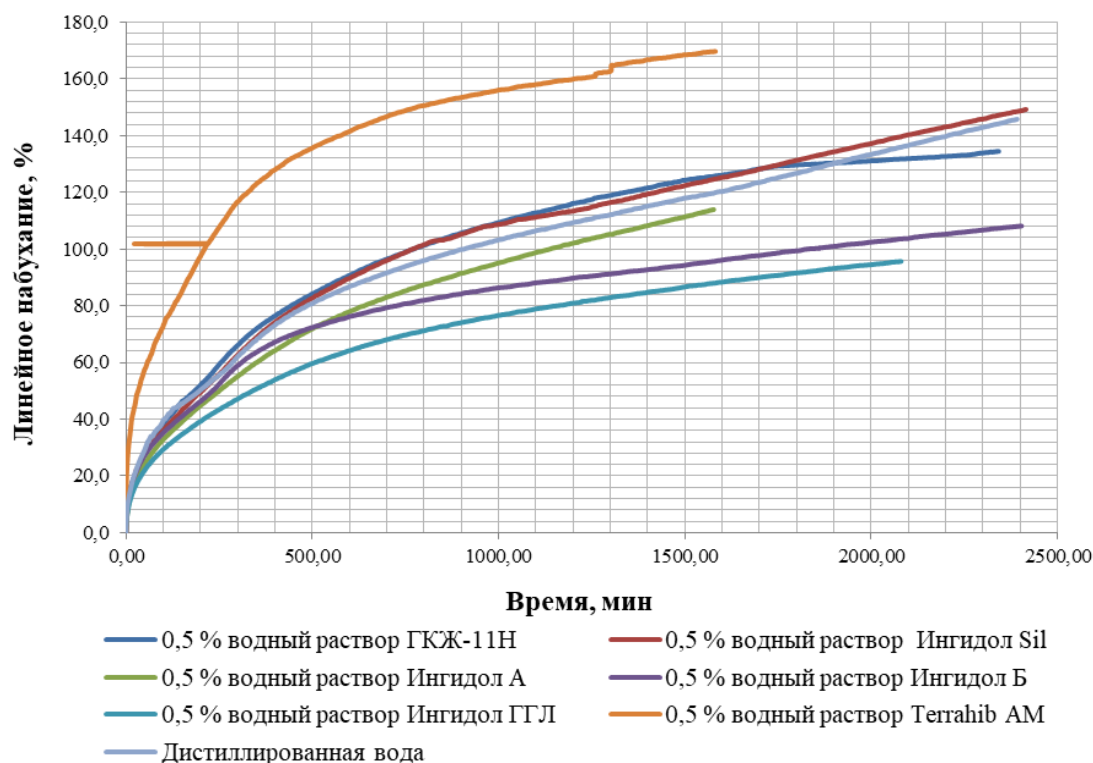


Рис. 1. График набухания образца в водных растворах ингибиторов

Fig. 1. Graph of sample swelling in aqueous solutions of inhibitors

Таблица 4. Результаты линейного набухания брикета

Table 4. Results of a briquette linear swelling

Среда Medium	Расширение брикета, % Briquette expansion, %
Ингидол А/Ingidol A	110
Ингидол Б/Ingidol B	107
Terra Hib AM	170
Ингидол Sil/Ingidol Sil	147
Ингидол ГГЛ/Ingidol GGL	95
ГКЖ-11Н/GKZH-11N	134

Для получения сравнительных данных в лаборатории провели исследования по оценке влияния дистиллированной воды и водных растворов реагентов ингибиторов органических солей CaCl_2 , KCl , NaCl , $\text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ на брикеты из глинопорошка.

Кривые набухания приведены на рис. 2.

Обработанные результаты, полученные по графикам, приведены в табл. 5.

Импрегнирование дистиллированной воды и набухание брикета глинопорошка в начальной стадии происходит медленнее, чем в водных растворах солей, и продолжается по истечении более 170 ч.

На графике видно (рис. 2), что во всех растворах электролитов набухание стабилизировалось после 120 мин. Расширение брикета глинопорошка в KCl и CaCl_2 выше, чем в растворах солей $\text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и NaCl . Соли калия оказывают разупрочняющее действие на водную структуру, при этом вязкость воды снижается. Скорость проникновения водных растворов солей между глинистыми частицами возрастает, что приводит к большему набуханию (табл. 5).

Соли магния и натрия оказывают упорядочивающее действие на молекулы воды, при этом вязкость

водной фазы возрастает, вместе с тем замедляется скорость проникновения водной фазы между частицами глинопорошка (табл. 5).

Таблица 5. Результаты тестирования ингибиторов в LSM OFITE

Table 5. Inhibitor test results at LSM OFITE

Среда Medium	Расширение брикета, % Briquette expansion, %
CaCl_2 , 5 %	134
KCl , 5 %	132
NaCl , 5 %	110
$\text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 5 %	95
Дистиллированная вода Distilled water	170

Отсюда следует, что для бурения интервала пластичных монтмориллонитовых глин натриевого типа в испытуемых средах предпочтительнее использовать ингибирующие буровые растворы с содержанием хлорида магния и натрия.

Необходимо учесть, что реагенты-электролиты являются сильными коагулянтами коллоидных систем и их использование в глинистых суспензиях весьма затруднено, поэтому такие типы ингибиторов чаще применяются в безглинистых буровых растворах (например, биополимерный хлоркалийный раствор) [20].

На втором этапе было выполнено исследование по влиянию реагентов ингибиторов на параметры бурового раствора. Для этого приготавливали пресный глинистый буровой раствор с 0,5 % содержанием реагента ингибитора. По итогам экспериментов полученные показатели влияния ингибиторов на параметры пресного глинистого бурового раствора сведены в табл. 6.

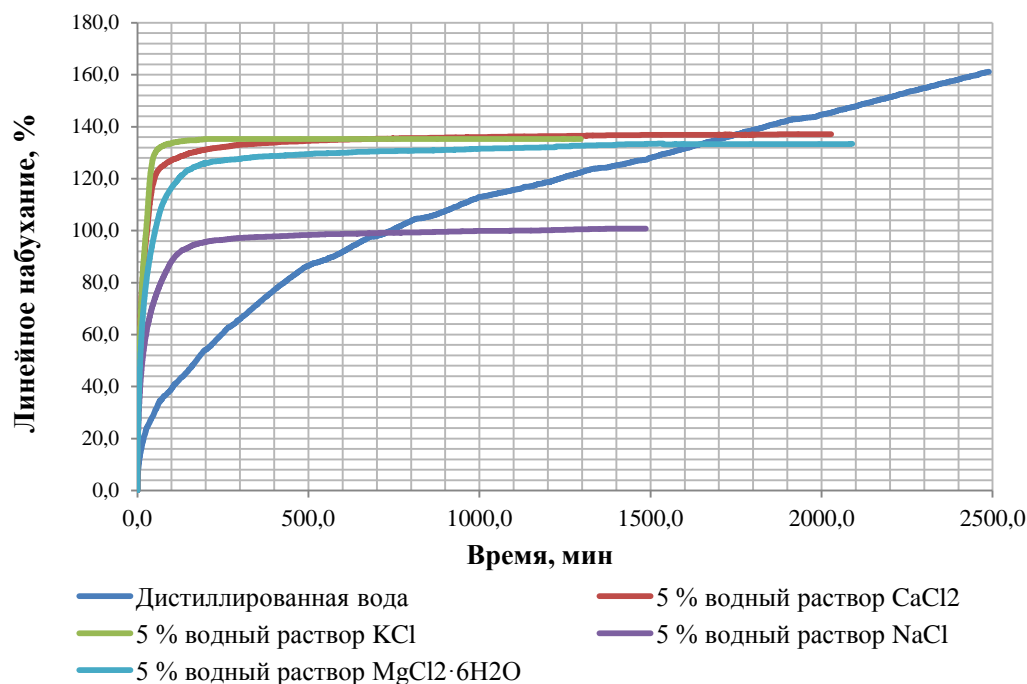


Рис. 2. График набухания образца в водных растворах солей

Fig. 2. Graph of sample swelling in aqueous solutions of salts

Таблица 6. Результаты замера параметров бурового раствора

Table 6. Drilling fluid measurement results

Среда/Medium	Параметры/Parameters						
	УВ _{700/500} , с FV _{700/500} , s	ПВ, сПз PV, sPz	ДНС, дПа YP, dPa	CHC _{10/10} , дПа GS _{10/10} , dPa	Ф ₃₀ по API, см ³ F ₃₀ by API, cm ³	K _{лип} C _{lip}	pH
Пресный глинистый раствор Fresh clay	Не течет Does not flow	1,9	246,0	282/363	15,0	0,0437	9,84
Ингидол А Ingidol A	Не течет Does not flow	2,4	260,0	289/486	17,2	0,0480	9,83
Ингидол Б Ingidol B	27,4	6,0	78,0	145/306	13,0	0,0393	9,74
Terra Hib AM	Не течет Does not flow	0,3	434,0	330/278	19,0	0,0480	9,15
Ингидол Sil Ingidol Sil	33,4	9,6	57,0	54/53	23,5	0,0393	9,96
Ингидол ГГЛ Ingidol GGL	75,8	2,4	198,0	256/459	17,0	0,0437	9,78
ГКЖ-11Н GKZH-11N	42,8	18,4	61,0	140/249	18,5	0,0262	9,81

Примечание: УВ – условная вязкость; ПВ – пластическая вязкость; ДНС – динамическое напряжение сдвига; CHC – статическое напряжение сдвига; Ф – статическая фильтрация; K_{лип} – коэффициент липкости глинистой корки.

Note: FV_{700/500} – funnel viscosity; PV – plastic viscosity; YP – yield point; GS_{10/10} – gel strengths (for 10 seconds and 10 minutes); F₃₀ by API – filtration for 30 minutes by API; C_{lip} – stickiness coefficient; pH – hydrogen ion exponent.

В целом по данным табл. 6 можно отметить, что реагенты Ингидол Б, Ингидол Sil, ГКЖ-11Н, Ингидол ГГЛ активно разжижают буровой раствор.

Ингибитор Индиол А интенсивно загущает буровой раствор, увеличивая при этом показатели динамического напряжения сдвига и фильтрации. Данный ингибитор в большей степени предназначен для скважин, сложенных аргиллитоподобными и алевролитистыми отложениями.

Экспериментально установлено, что добавление Индиол Б в пресный глинистый буровой раствор способствует его разжижению, снижению реологических и фильтрационных свойств. Усиление ингиби-

рующего эффекта связано с повышением молекулярной массы полимера. Полимеры создают водные сетки с молекулами воды и скрепляют частицы глины.

Органический ингибитор Terra Hib AM на основе поламинов в глинистых системах не работоспособны. Добавка снижает пластическую вязкость практически до нулевых значений, при этом степень ингибирования остается равной исходному раствору 170 % (табл. 4, 5).

Реагент на основе кремнийорганических соединений Ингидол Sil является сильным разжижителем бурового раствора, при его введении в раствор наблюдалось повышение показателя фильтрации и резкое

снижение структурно-механических и реологических свойств.

Из всех вышеперечисленных ингибирующих добавок только Ингидол ГГЛ значительно снижает расширение кернового материала 95 %. Он изготовлен на основе битума и производных гильсонита, что положительно сказалось на закупоривающих свойствах раствора.

При введении в буровой раствор кремнийорганической соли метилсиликоната натрия ГКЖ-11Н раствор разжижается, снижаются структурно-реологические параметры, повышается фильтрация. ГКЖ-11Н, так же как и Ингидол Sil, показал повышенные значения расширения кернового материала на 134 %.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы. – М.: Недра, 1999. – 424 с.
2. Грей Дж.Р., Дарли Г.С.Г. Состав и свойства буровых агентов (промывочных жидкостей). – М.: Недра, 1985. – 509 с.
3. Устойчивость пород при бурении скважин / М.М.-П. Гайдаров, А.Д. Норов, А.А. Хуббатов, А.И. Иванов, А.М. Гайдаров, Ю.М. Богданова, С.А. Кравцов, И.Г. Поляков, Г.Б. Касымов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2013. – № 7. – С. 20–30.
4. Булатов А.И., Пеньков А.И., Проселков Ю.М. Справочник по промывке скважин. – М.: Недра, 1984. – 317 с.
5. Белоруссов В.О. Технология борьбы с осложнениями при бурении скважин. – М.: Недра, 1967. – 162 с.
6. Mahto V., Sharma V. Rheological study of a water based oil well drilling fluid // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2004. – V. 45. – Iss. 1–2. – P. 123–128.
7. Ibelegbu Ch. Productivity index in horizontal wells // Journal of Scientific & Industrial Research. – 2004. – № 63. – P. 979–984.
8. Исследование влияния состава эмульсионных буровых растворов на их показатели / А.И. Ламбин, В.М. Иванишин, Р.У. Сираев, Е.В. Аверкина, Э.В. Шакирова, А.В. Коротков // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2015. – № 4 (53). – С. 58–66.
9. Применение нефти в качестве смазочной добавки в буровом растворе (на примере Ярактинского нефтегазоконденсатного месторождения) / Э.В. Шакирова, Е.В. Аверкина, Т.Р. Сабиров, К.О. Перышкина // Нефтегазовое дело. – 2018. – Т. 16. – № 2. – С. 12–19.
10. Применение ингибирующих композиций органического и неорганического типа / В.Н. Сас, И.В. Панов, Р.О. Кожевников, Е.Я. Мелешко // Бурение и нефть. – 2017. – № 12. – С. 30–33.

Информация об авторах

Аверкина Е.В., старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета.

Шакирова Э.В., кандидат политических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета.

Николаева М.Б., магистр Института геологии и нефтегазовых технологий Казанского федерального университета.

Климова А.А., младший научный сотрудник лаборатории буровых растворов и крепления скважин кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета.

- 1) Соли $MgCl \cdot 6H_2O$ и $NaCl$, структурирующие молекулы воды, снижают набухание глинопорошка.
- 2) Среди органических реагентов лучший результат по ингибированию набухания в концентрации 0,5 % показали реагенты Ингидол ГГЛ и Ингидол Б.
- 3) При введении в глинистый раствор органических ингибиторов на основе кремнийорганических композиций и природных аминов наблюдалось его активное разжижение.
- 4) Все образцы ингибиторов в разной степени оказывают влияние на параметры бурового раствора, наиболее благоприятными для использования в пресном глинистом буровом растворе на основе бентонитовой немодифицированной глины оказались Ингидол Б и Ингидол Sil. Остальные образцы также могут успешно использоваться при дальнейшей обработке раствора для регулирования реологических параметров и показателя фильтрации после проведенных дополнительных исследований.

11. Henriksen K.H., Gule E.I., Augustine J. Case study: the application of inflow control devices in the troll oil field // SPE-100308-SM. Annual conference and exhibition. – Vienna, Austria, 12–15 June 2006. – P. 1–5.
12. Fink J. Petroleum engineers guide to oil field chemicals and fluids. – Waltham, MA: Gulf Professional Publ., 2011. – 808 p.
13. Akangbou H.N., Burby M.L., Nasr G.G. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – № 11. – С. 59–62.
14. Особенности набухания глин в растворах электролитах / Г.М. Панахов, Э.М. Аббасов, А.О. Юзбашиева, В.Д. Балакчи // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 4. – С. 93–109.
15. Tarek A. Ganatana, Meftah Hrairi. A new choke correlation to predict flow rate of artificially flowing wells // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 171. – P. 1378–1389.
16. Чудинова И.В., Николаев Н.И. Разработка состава и исследование свойств бурового раствора для бурения скважин в неустойчивых глинистых породах // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 8. – С. 85–89.
17. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling / J. Yang, W. Chen, D. Yang, J. Yuan // Computers and Geotechnics. – 2015. – V. 64. – P. 20–31.
18. Horizontal drilling – a new production method / J.C. Bosio, R.W. Fincher, J.F. Giannesini, J.L. Hatten // XII World Petroleum Congress. – USA, 1987. – P. 18–22.
19. Дегтярев Д.Ф. Оценка воздействия минерального и органического ингибиторов на бентонитовую глину // Георесурсы. – 2018. – Т. 20. – № 4. – С. 355–358.
20. Moritis G. Worldwide horizontal drilling surges // Oil and gas journal. – 1989. – V. 87 (9). – P. 53–64.

Поступила 18.11.2020 г.

UDC 662.24.06

COMPARATIVE ANALYSIS OF REAGENTS-INHIBITORS OF SWELLING OF CLAY DEPOSITS USED IN EASTERN SIBERIA

Elena V. Averkina¹,
averkina.l@yandex.ru

Elvira V. Shakirova¹,
viva160@mail.ru

Margarita B. Nikolaeva²,
margaritanik97@mail.ru

Aina A. Klimova¹,
cherdanceva94@yandex.ru

¹ Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

² Kazan Federal University,
18, Kremlevskaya street, Kazan, 420008, Russia.

The relevance. The subsalt structural complex of Eastern Siberian deposits includes Ordovician deposits, which are mainly represented by sandy loams, loams, clays, siltstones, marls and dolomites. The subsalt complex consists of mudstones, dolomites, limestones, as well as their intercalation. When drilling oil wells, a large number of complications can cause swelling of clay rocks: sticking of a drilling tool, cavern formation, gland formation, expansion of the wellbore, loss of circulation, etc. The drilling fluid must have a high inhibitory ability to minimize the swelling rate.

The main aim of the research is to study the inhibiting property of reagents, which represent compositions of amines, polyamides and some other compounds.

Object: drilling fluid used in the fields of Eastern Siberia.

Methods. To define the linear swelling of clay the authors have used the Linear Swellmeter OFITE model, which determines the hydration or dehydration of clays and clay rocks by measuring the change in the linear dimensions of the clay sample. The effect of inhibitor reagents on drilling fluid rheological parameters was studied using traditional methods.

Results. It was found that $MgCl \cdot 6H_2O$ and NaCl salts, which structure water molecules, reduce the swelling of clay powder. All the studied inhibitor samples to varying degrees affect the parameters of the drilling fluid, Ingidol B and Ingidol Sil were the most favorable for use in fresh clay drilling mud based on unmodified bentonite clay. The remaining samples can also be successfully used during further processing of the solution to control the rheological parameters and the filtration index after additional studies.

Key words:

Drilling mud, inhibitors, clay deposits, Eastern Siberia, rheological properties.

REFERENCES

1. Bulatov A.I., Makarenko P.P., Proselkov Yu.M. *Burovye promyvochnye i tamponazhnye rastvory* [Drilling flushing and grouting solutions]. Moscow, Nedra Publ., 1999. 424 p.
2. Gray J.R., Darley G.S.G. *Sostav i svoystva burovyykh agentov* [Composition and properties of drilling agents (flushing fluids)]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 509 p.
3. Gaydarov M.M.-R., Norov A.D., Khubbatov A.A., Ivanov A.I., Gaydarov A.M., Bogdanova Yu.M., Kravtsov S.A., Polyakov I.G., Kasymov G.B. Ustoychivost porod pri burenii skvazhin [Stability of rocks during well drilling]. *Stroitel'svo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2013, no. 7, pp. 20–30.
4. Bulatov A.I., Penkov A.I., Proselkov Yu.M. *Spravochnik po promyke skvazhin* [Guide to flushing wells]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 317 p.
5. Belarus V.O. *Tekhnologiya borby s oslozheniyami pri burenii skvazhin* [Technology for dealing with complications when drilling wells]. Moscow, Nedra Publ., 1967. 162 p.
6. Mahto V., Sharma V. Rheological study of a water based oil well drilling fluid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, vol. 45, Iss. 1–2, pp. 123–128.
7. Ibelegbu Ch. Productivity index in horizontal wells. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2004, no. 63, pp. 979–984.
8. Lambin A.I., Ivanishin V.M., Siraev R.U., Averkina E.V., Shakirova E.V., Korotkov A.V. Investigation of the effect of the composition of emulsion drilling fluids on their performance. *Proceedings of the Siberian Branch of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, prospecting and exploration of ore deposits*, 2015, no. 4 (53), pp. 58–66. In Rus.
9. Shakirova E.V., Averkina E.V., Sabirov T.R., Peryshkina K.O. The use of oil as a lubricant in a drilling fluid (for example, the Yarakta oil and gas condensate field). *Oil and gas business*, 2018, vol. 16, no. 2, pp. 12–19. In Rus.
10. Sas V.N., Panov I.V., Kozhevnikov R.O., Meleshko E.Ya. The use of inhibitory compositions of organic and inorganic type. *Drilling and oil*, 2017, no. 12, pp. 30–33. In Rus.
11. Henriksen K.H., Gule E.I., Augustine J. Case study: the application of inflow control devices in the troll oil field. *SPE-100308-SM. Annual conference and exhibition*. Vienna, Austria, 12–15 June 2006. pp. 1–5.
12. Fink J. *Petroleum engineers guide to oil field chemicals and fluids*. Waltham, MA, Gulf Professional Publ., 2011. 808 p.
13. Akangbou H.N., Burby M.L., Nasr G.G. Effectively optimizing production of horizontal wells in homogeneous oil reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, no. 11, pp. 59–62.
14. Panakhov G.M., Abbasov E.M., Yuzbashieva A.O., Balakchi V.D. Features of clay swelling in electrolyte solutions. *Oil and gas business*, 2019, no. 4, pp. 93–109. In Rus.
15. Tarek A. Ganatana, Meftah Hrairi. A new choke correlation to predict flow rate of artificially flowing wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 171, pp. 1378–1389.
16. Chudinova I.V., Nikolaev N.I. Development of the composition and study of the properties of drilling mud for drilling wells in un-

- stable clay rocks. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2019, no. 8, pp. 85–89. In Rus.
17. Yang J., Chen W., Yang D., Yuan J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 64, pp. 20–31.
18. Bosio J.C., Fincher R.W., Giannesini J.F., Hatten J.L. Horizontal drilling – a new production method. *XII World Petroleum Congress*. USA, 1987. pp. 18–22.
19. Degtyarev D.F. Evaluation of the effect of mineral and organic inhibitors on bentonite clay. *Geo-resources*, 2018, vol. 20, no. 4. pp. 355–358. In Rus.
20. Moritis G. Worldwide horizontal drilling surges. *Oil and gas journal*, 1989, vol. 87(9), pp. 53–64.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Elena V. Averkina, senior lecturer, Irkutsk National Research Technical University.

Elvira V. Shakirova, Cand Sc., associate professor, Irkutsk National Research Technical University.

Margarita B. Nikolaeva, master, Kazan Federal University.

Aina A. Klimova, junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

УДК 631.4:504.5:622.7

ЭКОГЕОХИМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА НА УЧАСТКАХ АЛМАЗОДОБЫЧИ В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ

Гололобова Анна Григорьевна¹,
nuta0687@mail.ru

Легостаева Яна Борисовна²,
ylego@mail.ru

¹ Научно-исследовательский институт прикладной экологии Севера
им. проф. Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова,
Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 43.

² Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
Россия, 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 39.

Актуальность исследования обусловлена слабой изученностью воздействия горнодобывающей деятельности на компоненты природной среды в условиях распространения многолетнемерзлых пород.

Цель: геоэкологический мониторинг почвенного покрова на территории разработки коренных месторождений алмазов в Западной Якутии на примере промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината.

Объекты: мерзлотные почвы северо-таежных ландшафтов Западной Якутии.

Методы: потенциометрический, колориметрический, пипеточный, атомно-абсорбционный, статистические методы.

Результаты. Представлены данные о состоянии почвенного покрова территории промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината за десятилетний период – 2007–2018 гг. Геохимический ряд распределения химических элементов в порядке убывания их средних значений для верхнего слоя почв (0–20 см) выглядит следующим образом: $Mn > Zn > Ni > Cu > Co > Cr > Pb > As > Cd$. Зафиксировано пространственное увеличение контрастности техногенных аномалий, характеризующих активное накопление подвижных форм Mn (в 17 раз), Zn (в 5 раз), Cd (в 2,6 раз), Cr (в 2 раза), Co (в 1,8 раз) и Ni (в 1,6 раза) в поверхностных органогенных горизонтах почв. Накопление Mn , Ni , Co обусловлено преимущественно природными (типоморфные кимберлитам элементы) и техногенными (азрогенное распространение мелкодисперсных частиц в результате буровзрывных работ, ветровая эрозия отвалов) факторами. Выявлены положительные корреляции между парами $Mn-Zn$, $Mn-Cd$, $Mn-Pb$, $Zn-Ni$, $Zn-Cd$, $Cr-Cu$ ($r \geq 0,5$), а также влияние органического вещества на содержание Mn ($r=0,5$), и значений pH на содержание Cr ($r=0,8$) и Cu ($r=0,5$). Построены карты эколого-геохимического состояния почвенного покрова территории промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината. В настоящий момент более 260 км² промышленной площадки характеризуется высоко опасной категорией загрязнения почвенного покрова с $Zc > 128$.

Ключевые слова:

Западная Якутия, карьеры по добыче алмазов, кимберлитовые трубки, тяжелые металлы, подвижные формы микроэлементов, мерзлотные почвы, суммарный показатель загрязнения почв.

Введение

Добыча природных минеральных ресурсов неизбежно приводит к негативному воздействию на состояние окружающей среды. Крайне неблагоприятное влияние на экологическое состояние компонентов экосистемы оказывает открытый способ добычи полезных ископаемых [1]. Вследствие интенсивной разработки открытых месторождений с использованием мощной техники и добывающего оборудования формируются обширные площади с техногенным рельефом, происходит нарушение природного ландшафта, водного режима рек и многие другие проблемы вплоть до локальных и региональных экологических катастроф. В том числе при производстве горных работ происходит загрязнение прилегающих территорий, возникают очаги эрозии, почвенный слой подвергается физическому, механическому и химическому воздействию. За пределы горного отвода распространяются миграционные геохимические потоки, характеризующиеся повышенными концентрациями тяжелых металлов [2–8]. Загрязнение почв тяжелыми металлами, такими как Pb , Ni , Mn , Cd , Co , Cr , Zn , Cu и As , довольно опасно [9, 10]. При этом почвенный по-

кров является идеальной депонирующей средой для оценки воздействия горнодобывающих предприятий, что показано во многих российских [1, 4, 5, 11, 12] и зарубежных [13–18] работах. Положение осложняется слабой устойчивостью северных экосистем к различным формам антропогенной деятельности [19]. В северных районах почвы, которые считаются «самоочищающимся фильтром» природы, во многом теряют свое обеззараживающее свойство из-за малой мощности профиля, слабого дренажа, ежегодного промерзания, способствующего концентрации в почвенных водах загрязнителей, краткого периода биологической жизни, а также наличия водоупора в виде надмерзлотного горизонта. Эти особенности обуславливают низкую устойчивость мерзлотных почв и ускорение процессов их загрязнения в зонах техногенного давления [1, 20–23]. Следовательно, возникает необходимость проводить оценку загрязнения почв криолитозоны, что является неотъемлемой составной частью комплексных геоэкологических исследований, создающих базу для планирования мероприятий по снижению последствий разработки рудных и россыпных месторождений алмазов в условиях криогенеза.

Исследования проводились в центральной части Якутской алмазоносной провинции в Средне-Мархинском алмазоносном районе. Первые алмазы были выявлены амакинскими геологами в 1950 г. в русловом аллювии р. Марха. И только после 40 лет длительных поисков Ботуобинской комплексной геологоразведочной экспедицией на левобережье р. Марха в междуречье Накын и Ханья были обнаружены высокоалмазоносные кимберлитовые трубки Ботуобинская (1994), Нюрбинская (1996), Мархинская (1999) и Майская (2006), сопровождаемые погребенными россыпями алмазов [24–26]. Накынское кимберлитовое поле относится к территориям со сложными поисковыми условиями. Все вмещающие кимберлиты образования и магматические проявления переработаны древней мезозойской корой выветривания, карстовыми процессами и перекрыты мощным (от 40 до 100 м и более) чехлом юрских морских отложений [27, 28]. В отличие от Мирнинских и Далдыно-Алаkitских крупных месторождений, в которых кимберлиты подходят к поверхности, как на «Зарнице», «Мире» или «Удачном». Поэтому, чтобы добраться до рудного тела, нужно произвести вскрышу в размере около 8 млн м³ [29]. В результате таких объемных работ на территории промышленной площадки образуются огромные массивы из вскрышных пород – отвалы, являющиеся дополнительным источником выбросов пыли и различных газов.

В результате почти тридцатилетней деятельности создана природно-техногенная система, в которую включены два карьера по добыче кимберлитовой руды «Нюрбинская» и «Ботуобинская», обогащательная фабрика № 15 (с 1999 г.), геологическая фабрика № 17 (небольшая фабрика, построенная в 2007 г.), обогащательная фабрика № 16 (с 2003 г.), вахтовый поселок на 1000 человек, взлетно-посадочные полосы, склад материалов взрывчатых веществ и источники, связанные с процессами добычи и обогащения, – хвостохранилище, отвалы пустых пород, пульпопроводы и др.

Накынское кимберлитовое поле расположено на сочленении Анабаро-Оленекской антиклизы и Вилюйской синеклизы и приурочено к Вилюйско-Мархинской кимберлитоконтролирующей тектонической зоне глубинных разломов. Территория представляет собой слабопересеченную местность с перепадом высот не более 50 м. Рельеф территории – среднерасчлененное плато. Главной особенностью является расположение в зоне распространения вечной мерзлоты. Резко континентальный климат благодаря значительным колебаниям температур и продолжительности зимнего периода создает благоприятную обстановку для сохранения и развития толщи многолетних пород. В условиях низкой относительной влажности воздуха, высоких летних температур и недостаточного количества атмосферных осадков летнее оттаивание мерзлоты способствует постоянному увлажнению почвы, создавая своеобразную зону развития криогенных процессов. По геоботаническому районированию исследуемая территория входит в среднетаежную и северотаежную подзоны бо-

реальной области. Для них характерно развитие древесного яруса, господствующей породой является лиственница Гмелина (*Larix gmelinii*) и Каяндера (*L. cajanderi*) [10].

Объекты и методы исследования

В структуре почвенного покрова территории промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината (НГОКа) распространены следующие подтипы почв: криоземы гомогенные надмерзлотно-глееватые, криоземы гомогенные неоглеевые, криоземы тиксотропные, криоземы глееватые оподзоленные, криоземы гомогенные перегнойно-глеевые, мерзлотные палево-бурые, мерзлотные палевые типичные, мерзлотные дерново-карбонатные, мерзлотные перегнойно-глеевые, мерзлотные аллювиальные дерновые почвы.

Криоземы занимают 84 % в структуре почвенного покрова территории промышленной площадки НГОКа, являются доминирующими типами почв и характеризуются маломощным почвенным профилем с ярко выраженными процессами криотурбации, приводящими к нарушению цельности генетических горизонтов и перемешиванию почвенного материала по профилю [10].

Полевые исследования были проведены в 2007–2018 гг. с периодичностью в 3–4 года на территории северо-таежных ландшафтов Ханья-Накынского междуречья в Западной Якутии в пределах промышленной площадки НГОКа. Для создания информационной базы равномерно по всей площадке заложена сеть наблюдений с шагом опробования 2×2 км в масштабе 1:100000 км. Пробы почв отбирались по мониторинговым точкам из поверхностного слоя почв на глубину 0–20 см (рис. 1). Параллельно для характеристики почвенного покрова заложены почвенные разрезы в разных биотопах с погоризонтным отбором проб на всю глубину оттайки. Отбор проб, их транспортировку и подготовку к лабораторному анализу осуществляли общепринятыми в почвоведении методами. Всего отобрано и проанализировано 436 проб почвенных образцов.

В образцах почв определяли подвижные формы Pb, Ni, Mn, Cd, Co, Cr, Zn, Cu и As методом атомно-абсорбционной спектроскопии на МГА-915 ГК Люмэкс в экстрагенте 1 Н HNO₃, который в отличие от H₂O и 1 Н HCl вытяжек извлекает кислоторастворимые элементы, более прочно связанные с почвой [22, 30–33]. Физико-химические показатели определены потенциометрическим методом (рН), методом колориметрии – содержание органического вещества по И.В. Тюрину, общего азота, гранулометрический состав по Качинскому. Полученные количественные данные были обработаны с использованием программ Microsoft Excel 2013, Statistica 6.0, OriginPro 8.5.1. Построение карт выполнено с помощью программы ArcGIS 9.0.

При санитарно-гигиенической оценке загрязнения почв химическими веществами нормативами являются предельно-допустимые концентрации (ПДК), характеризующие токсичность поллютантов [34]. Для

оценки интенсивности накопления химических элементов в почве применяли расчетные коэффициенты: коэффициент концентрации (K_c), показатель суммарного загрязнения почвенного покрова (Z_c), с анализом

коэффициентов с $K_c > 1,5$. Градация степени загрязнения почвенного покрова: Z_c : < 16 – допустимая; $16-32$ – умеренно-опасная; $32-128$ – опасная; ≥ 128 – чрезвычайно опасная [35].

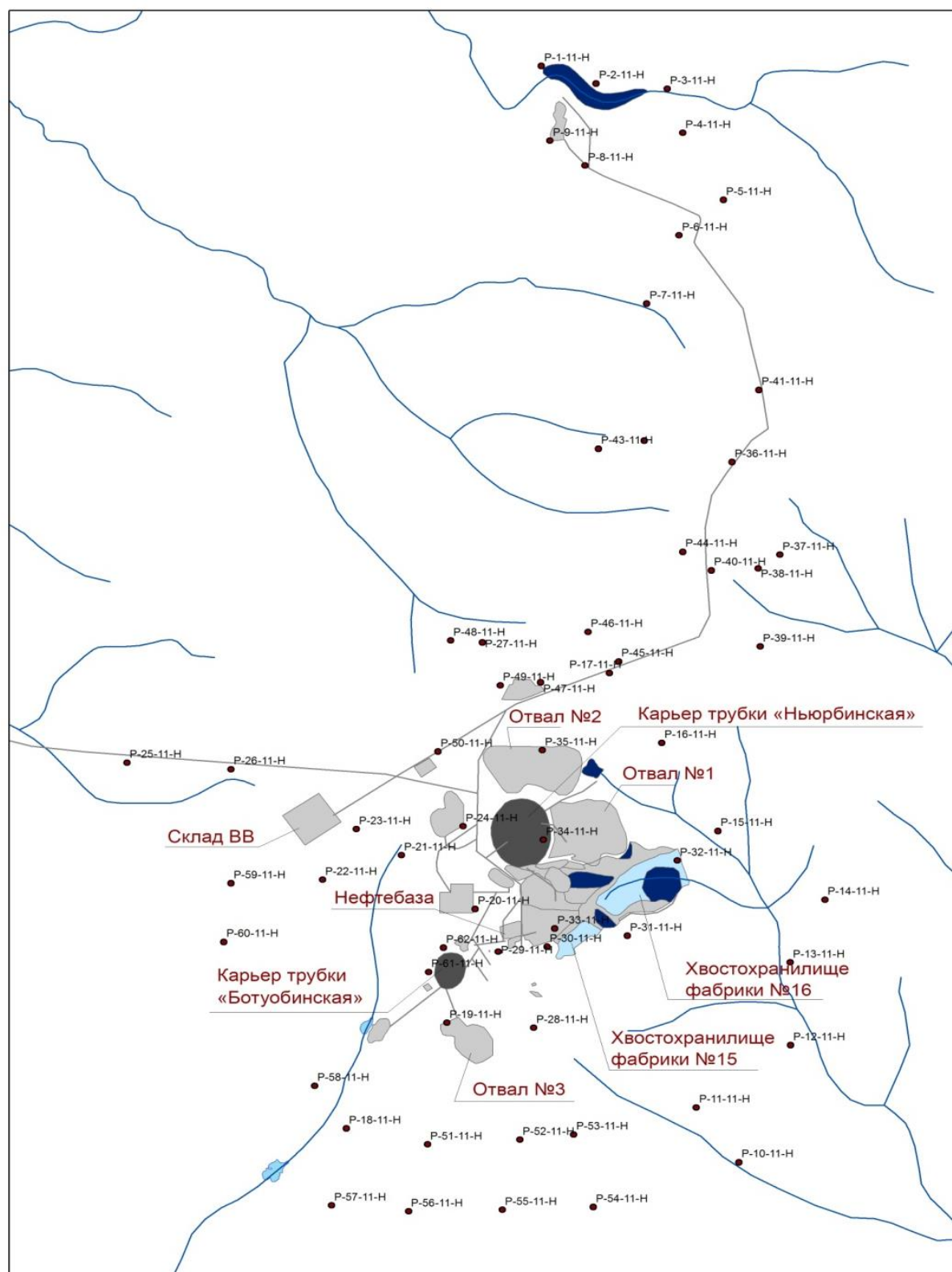


Рис. 1. Карта-схема отбора проб почв на территории промышленной площадки НГОК [10]

Fig. 1. Map-scheme of soil sampling on the territory of industrial site of Nyurbinsky Mining and Processing Plant (NMPP)

Результаты и их обсуждение

Физико-химические свойства и геохимическая характеристика почв. За одиннадцатилетний период наблюдения на территории Ханья-Накынского междуречья произошли значительные изменения природных ландшафтов, связанные со строительством, эксплуатацией объектов производственного комплекса НГОКа, развивающейся инфраструктурой, введением с 2012 г. карьера трубки «Ботуобинская».

Полученные данные показали, что в настоящий момент почвенный покров территории промзоны НГОКа характеризуется преимущественно кислой реакцией почвенной среды (табл. 1). Самая высокая кислотность характерна для верхних органогенных горизонтов, что связано с наибольшим содержанием органического вещества [36], высокие значения которого обуславливают наличие в почвах средне- и слабо разложившихся органических остатков, что в целом характерно для почв северных областей. Расчет соотношения углерода к азоту ($C/N=13$) свидетельствует о слабом разложении растительных остатков.

Таблица 1. Общие вариационно-статистические характеристики состояния почв территории промышленной площадки НГОКа за период исследований

Table 1. Basic variational-statistical characteristics of soil state in the territory of the industrial site of the NMPP for the period of research

Показатель Index	$M \pm m$	Lim	Доверительный интервал при $P=0,05$ Confidence interval at $P=0,05$	V, %
$pH_{водн}/pH_{H_2O}$	$5,38 \pm 0,12$	4,5...7,1	5,2...5,6	13
Гумус/Gumus, %	$5,6 \pm 1,1$	0,9...22,8	2,7...8,5	94
$N_{общ}/N_{total}$, %	$13,1 \pm 3,1$	2,8...40,6	7,0...19,2	82
Физическая глина ($<0,01$ мм) Physical clay ($<0,01$ mm), %	$22,1 \pm 1,7$	3,3...31,6	18,7...25,5	39

Наиболее высокие содержания отмечены в точках, находящихся непосредственно в зоне влияния промышленных объектов (около карьера трубки «Нюрбинская», отвала № 2, хвостохранилища № 16, вертолетной площадки), что показывает не столько содержание органического вещества, сколько присутствие в почве техногенной составляющей. При этом значительных вариаций содержания гумуса по годам исследований не выявлено. В условиях загрязнения почвы утрачивают естественные черты из-за техногенного подавления процессов почвообразования. Поэтому существующие методы определения гумуса отражают не столько собственно гумусированность почв, сколько общее содержание углерода в них, в составе которого существенна техногенная составляющая (углеводороды топлива, смазочные масла и др.) [37].

Содержание гумуса в почвенном профиле колеблется в довольно широких пределах: от низкого (0,6 %) до очень высокого (9,0 %). Отмечаются два пика органического накопления: в верхней части поч-

венного профиля, связанного с биогенным накоплением, которое является естественным из-за высокого содержания слабо разложившегося органического вещества, и в нижней части почвенного профиля, являющегося следствием криогенных процессов, связанных с подвижностью гумуса и разрушением вечной мерзлоты, то есть перемешиванием и протеканием через трещины [10, 11, 36].

Количество физической глины характерно для легкосуглинистого гранулометрического состава, с преобладанием фракций мелкого песка (0,25...0,05 мм) и ила ($<0,001$ мм). Концентрация многих элементов в составе тонкодисперсных фракций почв как природных, так и техногенных ландшафтов, как правило, в 2–4 раза выше, чем в почве в целом. Это обусловлено главным образом поглотительной способностью глинистых минералов [32, 38].

Специфика элементного состава почвенного покрова связана, с одной стороны, с металлогеническим особенностями территории. С другой стороны, вероятно поступление тяжелых металлов в составе пылевых частиц, образующихся во время буровзрывных работ в карьере, погрузочных работ, транспортировки руды, ветровой эрозии поверхности отвалов, хвостохранилища и бортов карьера [1] и др.

Наиболее активными агентами загрязнения являются подвижные формы микроэлементов, способные переходить из твердых фаз в почвенные растворы и поглощаться растениями [39, 40]. Среднее содержание подвижных форм микроэлементов в почвах территории промышленной площадки НГОКа составляет (в мг/кг сухого вещества): свинца – 1,64; никеля – 7,17; марганца – 898,3; кадмия – 0,07; кобальта – 4,87; хрома – 4,30; цинка – 22,9; меди – 6,0; мышьяка – 0,12. Геохимический ряд распределения химических элементов в порядке убывания их средних значений для верхнего слоя почв (0–20 см) выглядит следующим образом: $Mn > Zn > Ni > Cu > Co > Cr > Pb > As > Cd$.

Значения, превышающие фоновые, отмечены для Mn (до 9 раз), Cd (до 2,3 раз), Zn (до 2 раз), Ni и Co (до 1,5 раз); выше ПДК – Mn (до 14 раз), Zn (до 4 раз), Cr (до 2 раз), Cd (до 1,6 раз) и Co (до 1,5 раз).

Если сравнивать содержание микроэлементов в почвах промышленной площадки НГОКа за период 2007–2018 гг. (рис. 2), произошло увеличение концентраций Mn (в 17 раз), Zn (в 5 раз), Cd (в 2,6 раз), Cr (в 2 раза), Co (в 1,8 раз) и Ni (в 1,6 раза). При этом отмечено снижение количества Pb. Содержание Cu и As в почвах осталось практически прежним.

На исследуемой территории в качестве реперных точек выбраны участки с разной техногенной нагрузкой и, соответственно, разным уровнем загрязнения почвенного покрова. Геохимические спектры, построенные на основе коэффициента концентрации (Kc), позволили выявить степень трансформации элементного состава почв за период наблюдений (табл. 2). Результаты показывают значительное повышение концентраций подвижных форм и расширение микроэлементного ряда. К 2018 г. в составе почвенного покрова промышленной площадки НГОКа прослеживается накопление Mn, Zn и Ni.

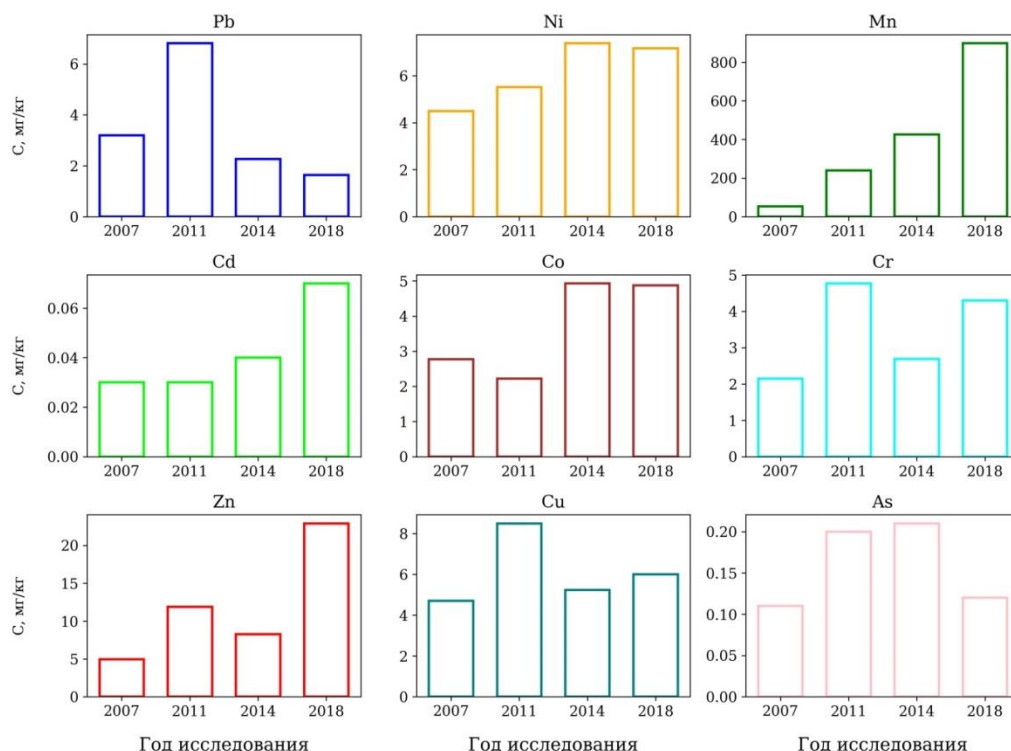


Рис. 2. Динамика содержания средних значений микроэлементов за период 2007–2018 гг.

Fig. 2. Dynamics of the content of the average values of trace elements for 2007–2018

Таблица 2. Характеристика микроэлементного состава почв на ключевых участках промышленной площадки НГОКа по данным исследований 2007–2018 гг.

Table 2. Microelement composition of soils in main sites of the study industrial site of the NMPP according to research for 2007–2018

№ т.н. No. o.p.	Исследования/Research			
	2007	2011	2014	2018
11	Mn _{8,7}	Mn _{24,2} →Zn _{10,7} →Cd _{0,1} →Co _{5,2} →Ni _{2,0} →Pb _{1,7}	Mn _{20,0} →Ni _{3,5} →Co _{3,0} →Cd _{2,2} →Zn _{1,5} (As _{1,5})	Mn _{290,4} →Zn _{5,4} →Ni _{3,8} →Co _{3,5} →Cd _{3,0}
14	Mn _{10,6} →Co _{5,3} →Ni _{4,8} →Cd _{3,0}	Mn _{44,7} →Ni _{4,1}	Mn _{19,6} →Ni _{7,0} →Co _{3,7} →Zn _{2,2} →Cr _{2,0} →Cd _{1,5}	Mn _{141,4} →Zn _{2,5}
16	Mn _{6,8} →Ni _{2,3}	Mn _{20,6} →As _{1,5}	Mn _{116,2} →Ni _{6,1} →Zn _{3,3} →Co _{3,1} →Cd _{3,0}	Mn _{186,8} →Zn _{4,7} →Ni _{2,0}
19	Mn _{4,3} →Ni _{2,9} →Co _{2,4}	Mn _{13,3} →Ni _{4,8} →Pb _{2,7}	Mn _{137,2} →Ni _{26,8} →Co _{12,9} →Cd _{3,4} →As _{2,3} →Zn _{1,9}	Mn _{69,7} →Ni _{4,5} →Zn _{4,1} →Cd _{3,4} →Co _{1,9}
24	Mn _{8,2} →Ni _{4,0} →Co _{2,4} →Zn _{1,6}	Mn _{85,0} →Ni _{4,5} →Cd _{4,3} →Pb _{2,8} →Zn _{2,0}	Mn _{29,6} →Ni _{5,0} →As _{2,3} →Co _{2,1} →Zn _{1,8}	Mn _{447,0} →Ni _{14,8} →Zn _{8,3} →Cd _{6,0} →Co _{4,6} →As _{1,7}
28	Ni _{1,8} →Mn _{1,6}	Zn _{11,6} →Cd _{11,0} →Ni _{4,6} →Mn _{3,6} →Pb _{2,6}	Mn _{24,2} →Ni _{3,9} →As _{2,0} →Cd _{1,7}	Mn _{230,3} →Cd _{8,2} →Zn _{5,2} →Ni _{3,2}
31	Mn _{3,5} →Co _{1,8} →Ni _{1,7}	Mn _{6,6} →Ni _{3,9} →Co _{2,5} →Cr _{1,6}	Mn _{5,0} →Ni _{3,5} →As _{2,1} →Co _{1,8}	Mn _{127,0} →Cr _{10,0} →Ni _{7,2} →Zn _{6,0} →Co _{4,6} →Cd _{4,1}
32	Ni _{2,9} (Mn _{2,9})	Mn _{40,8} →Co _{6,6} →Ni _{5,5} →Pb _{3,6} →Zn _{2,6}	Mn _{195,5} →Ni _{12,9} →Co _{3,1} →As _{2,4} →Zn _{2,0}	Mn _{160,3} →Zn _{4,7} →Ni _{3,0} →Cd _{2,5}
33	Mn _{2,0}	Mn _{17,2} →Co _{8,4} →Ni _{3,9} →Pb _{2,6} →Zn _{1,7}	Mn _{78,1} →Co _{1,9} →Ni _{1,7}	Mn _{181,9} →Ni _{12,8} →Zn _{9,4} →Co _{3,5} →Cd _{3,4}
34	—*	Mn _{8,0} →Pb _{3,3} (Co _{3,3})→Ni _{2,9} →Zn _{2,3}	Mn _{7,1} →Ni _{1,6}	Mn _{27,9} →Zn _{8,0} →Ni _{7,7} →Cr _{6,8} →Co _{4,2} →As _{2,0}
35	Mn _{2,6} →Ni _{1,9}	Mn _{57,3} →Ni _{5,4} →Co _{3,8} →Pb _{3,6} →Zn _{3,2}	Mn _{85,1} →Co _{3,2} →Ni _{2,5}	Mn _{669,4} →Ni _{16,11} →Zn _{7,3} →Cd _{4,2} →Co _{3,4}
43	Mn _{2,2} →Ni _{1,7}	Mn _{203,8} →Co _{32,5} →Ni _{8,0} →Cd _{3,7} →Pb _{3,2} →Zn _{2,6}	Mn _{222,0} →Co _{10,7} →Ni _{7,8} →Cd _{1,8}	Mn _{393,4} →Zn _{12,17} →Cd _{6,2} →Ni _{1,9}
50	Mn _{3,3} →Co _{2,7} →Ni _{2,4}	Mn _{5,2} →Pb _{2,6} →Zn _{1,9} →Ni _{1,7}	Mn _{131,5} →Co _{7,3} →Ni _{5,8} →Zn _{2,2}	Mn _{88,4} →Ni _{8,0} →Co _{7,1} →Zn _{4,8} →Cd _{4,7}
57	—	Mn _{18,6} →Ni _{2,3} →Co _{2,1} →Zn _{1,8} →Pb _{1,6}	Mn _{77,8} →Ni _{8,0} →Co _{3,6} →As _{2,5} →Zn _{2,4} →Cd _{1,6}	Mn _{824,1} →Zn _{5,4} →Pb _{4,4} →Ni _{3,7} →Cd _{3,2}
59	—	Mn _{6,7} →Cr _{2,4} →Ni _{2,2} →Zn _{2,1} →Pb _{1,9}	Mn _{339,8} →Ni _{14,4} →Co _{3,7} →Cd _{2,4} →Zn _{2,3}	Mn _{430,0} →Ni _{10,6} →Cd _{7,1} →Zn _{5,3} →Co _{1,8}
61	—	—	Mn _{22,2} →Ni _{3,7} →Co _{1,6}	Mn _{119,1} →Zn _{4,9} →Ni _{4,8} →Cd _{3,2} →Co _{2,5}

Примечание: «т.н.» – точка наблюдения, «—*» – нет превышения фоновых параметров, $K_{\text{к}} \leq 1,5$. Привязка точек наблюдения: 11 – 6 км на юго-восток от хвостохранилища; 14 – 4 км на восток от хвостохранилища; 16 – 2 км на северо-восток от отвала № 1 и хвостохранилища; 19 – около отвала № 3; 24 – развилка дорог; 28 – вертолетная площадка; 31 – 300 м на юг от хвостохранилища; 32 – восточная сторона хвостохранилища; 33 – около фабрики № 15; 34 – около карьера трубки «Нюрбинская»; 35 – около отвала № 2; 43 – 1,5 км на запад от дороги; 50 – дорога в сторону р. Марха; 57 – около буровой техники; 59 – 2 км на юго-запад от склада взрывчатых веществ; 61 – около карьера трубки «Ботубинская».

Note: "o.p." – observation point, «—*» – no excess of background parameters, $K_{\text{к}} \leq 1,5$. Binding of observation points: 11 – 6 km to the south-east of the tailing dump; 14 – 4 km to the east of the tailing dump; 16 – 2 km to the north-east of dump no. 1 and tailings; 19 – near dump no. 3; 24 – crossroads; 28 – helipad; 31 – 300 m to the south of the tailing dump; 32 – eastern side of the tailing dump; 33 – near factory no. 15; 34 – near the quarry «Nurbinsky»; 35 – near dump no. 2; 43 – 1,5 km to the west of the road; 50 – the road towards the Markha river; 57 – near drilling equipment; 59 – 2 km to the south-west of the explosives depot; 61 – near the quarry «Botubinsky».

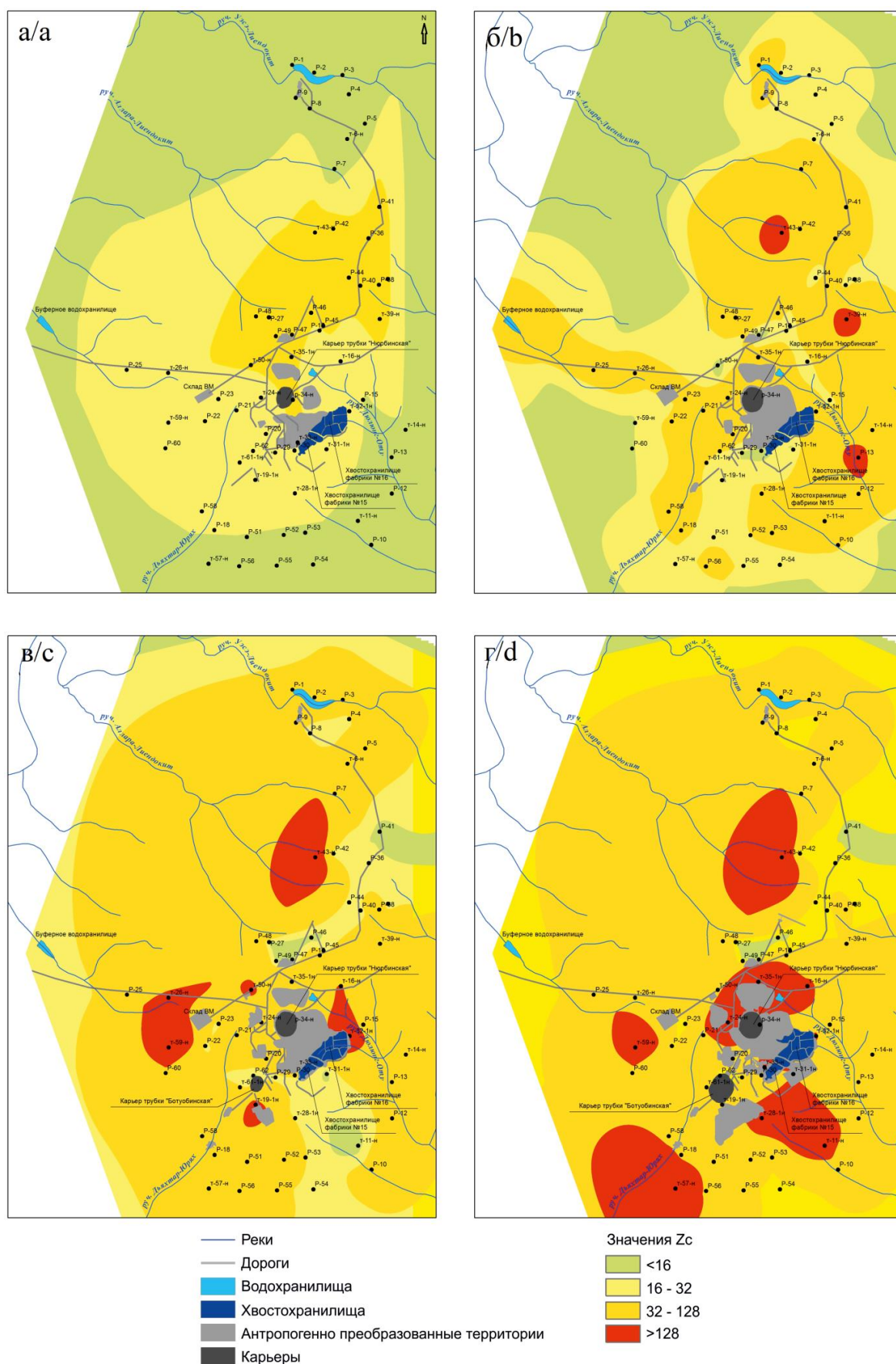


Рис. 3. Карта-схема суммарного загрязнения почвенного покрова территории промышленной площадки НГОКа по годам исследований [44]

Fig. 3. Map-scheme of the total pollution of the soil cover in the territory of industrial site of the NMPP by years of research

Ранее наблюдалось накопление Mn, Ni, Co, которые являются типоморфными кимберлитам и характеризуют как природную геохимическую аномалию, так и техногенную аномалию вторичного поверхностного загрязнения. На данный момент проявляется тенденция накопления Zn, доказывающее наличие техногенной составляющей в почвах промплощадки [30, 41].

Корреляционный анализ показал наличие взаимосвязей между концентрацией подвижных форм микроэлементов (все коэффициенты корреляции значимы при уровне значимости $P < 0,05$). Установлены заметные положительные корреляции между парами Mn–Zn, Mn–Cd, Mn–Pb, Zn–Ni, Zn–Cd, Cr–Cu ($r \geq 0,5$). Данные связи указывают на синергизм между вышеуказанными группами, т. е. увеличение одного микроэлемента влечет за собой увеличение концентрации другого [40]. Так, большое количество пар у марганца и цинка, что объясняет наличие их в первых рядах микроэлементных спектров. Кроме того, выявлено, что количество органического вещества влияет на содержание подвижных форм марганца ($r = 0,54$). Также довольно тесная зависимость установлена между pH и концентрацией подвижных форм хрома ($r = 0,76$) и меди ($r = 0,46$). При существующих значениях pH хром и медь являются инертными, т. е. почти полностью выпадают в осадок, чем и можно связать отсутствие этих элементов в микроэлементном спектре [42, 43].

Эколого-геохимическое состояние почвенного покрова территории НГОКа. Почвы исследуемой промышленной площадки характеризуются полиэлементным загрязнением. Использование формулы Саета позволяет оценить степень суммарного загрязнения почв (Zc) несколькими микроэлементами и тяжелыми металлами (рис. 3).

По данным исследований 2007 г. территория промышленной площадки характеризовалась преимущественно умеренно опасной ситуацией по содержанию подвижных форм микроэлементов, что составляло примерно 210 км². При этом порядка 10 % территории относились к высоко опасной категории загрязнения и занимали около 45 км² (рис. 3, а).

В 2011 г. наблюдалось увеличение условных границ ареалов загрязнения почвенного покрова. Эколого-геохимическая ситуация по-прежнему соответствует в основном категории умеренно опасной (~305 км²) при наличии участков с высоко опасной степенью загрязнения (~1,44 км²) (рис. 3, б).

По исследованиям 2014 г. эколого-геохимическая ситуация на территории промышленной площадки НГОКа характеризуется уже преимущественно высоко опасным уровнем загрязнения по показателю Zc [41] (рис. 3, в). Произошло увеличение ареала высоко опасного загрязнения на 120 км². Помимо этого, зафиксированы три площадные и две точечные высококонтрастные аномалии с чрезвычайно опасным уровнем загрязнения почвенного покрова, общая площадь которых в условных границах составляет порядка 18,2 км².

Таким образом, наблюдается пространственное увеличение контрастности выявленных техногенных

аномалий, характеризующих активное накопление подвижных форм микроэлементов в поверхностных органогенных горизонтах почв. Тренд увеличения имеет северо-западное и юго-восточное направление.

Исследования 2018 г. позволили локализовать и подтвердить увеличение площади загрязнения почвенного покрова на территории промышленной площадки НГОКа (табл. 3). Эколого-геохимическая ситуация ухудшилась с увеличением площади и контрастности загрязнения почв (рис. 3, г). Необходимо подчеркнуть, что наряду с общим увеличением площади загрязнения повысились абсолютные значения коэффициентов концентрации и, соответственно, суммарного показателя загрязнения.

Таблица 3. Площадь и уровень загрязнения почвенного покрова на территории промышленной площадки НГОКа

Table 3. Area and pollution level of soil cover in the territory of NMPP industrial site

Категория загрязнения Pollution category	Уровень суммарного показателя загрязнения Zc [35] Index of total pollution Zc	Площадь по годам исследований, км ² Area by years of research, km ²			
		2007	2011	2014	2018
Допустимая Permissible	<16	222,5	171,5	70,0	61,0
Умеренно опасная Moderately dangerous	16–32	210,0	305,0	267,0	104,9
Высоко опасная Highly dangerous	32–128	45,0	1,44	122,0	260,9
Чрезвычайно опасная Extremely dangerous	>128	–	–	18,2	51,6

Заключение

Результаты проведенных исследований выявили высокий уровень загрязнения почвенного покрова тяжелыми металлами на территории промышленной площадки НГОКа, где производят взрывные работы на карьерах, буровые работы, а также в районе отвалов вскрышных пород, хвостохранилища, склада взрывчатых веществ и вертолетной площадки.

Исследуемая территория расположена в зоне природной геохимической аномалии, сформированной в почвах в результате внедрения кимберлитов, высокие концентрации Ni, Cr, Co, Cu и Mn в почвах отражают геохимическую специфику территории Накынского кимберлитового поля. Анализ коэффициентов концентрации показал, что в почвенном покрове происходит также интенсивная аккумуляция марганца, цинка и никеля на участках, охватывающих основные объекты загрязнения.

Составлен геохимический ряд распределения химических элементов в порядке убывания их средних значений: Mn>Zn>Ni>Cu>Co>Cr>Pb>As>Cd. Выявлено синергическое взаимодействие марганца с цинком, кадмием, свинцом, а также цинка с никелем и

кадмием, вызванное под действием стресса из-за избыточных концентраций тяжелых металлов. В почвах промышленной площадки отмечены аномально высокие содержания подвижных кислоторастворимых форм марганца, превышения нормативов по общесанитарному показателю вредности подвижных форм Ni в 1,8 раз, Mn в 8,5 раз и Cu в 1,7 раз.

В формировании степени загрязнения почвенного покрова определённую роль играет ветровой перенос загрязняющих веществ, образующихся в результате добычи руды открытым способом, а также при пылении бортов карьеров, отвалов, хвостохранилища [1]. Выявленные ареалы с высокоопасным загрязнением почвенного покрова пространственно приурочены к карьерам трубков, отвалам пустых пород, территориям возле хвостохранилищ и россыпным проявлениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белошейкина А.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г. Эколого-геохимическая оценка состояния почвенного покрова территории Сорского горно-обогатительного комбината (Республика Хакасия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 1. – С. 44–53.
2. Евлампиева Е.П., Панин М.С. Накопление цинка, меди и свинца лишайником в районе угледобывающего месторождения «Каражыра» // Вестник томского государственного университета. – 2008. – № 314. – С. 196–200.
3. Сорокина О.А., Киселев В.И. Загрязнение почв в зоне освоения Джалиндзинского россыпного и рудного месторождений золота в Приамурье // Экология и промышленность России. – 2005. – № 7. – С. 24–28.
4. Басова И.А., Иоина М.А., Глухова Е.Н. Геоэкологическое состояние почвенного покрова в горнопромышленных регионах // Известия Тульского государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 16–20.
5. Басова И.А., Иватанова Н.П., Копылов А.Б. Оценка экологического состояния почв в регионах с развитой горной промышленностью // Известия Тульского государственного университета. – 2012. – № 1–2. – С. 14–16.
6. Исмаилов Б.Т. Технологии управления природно-техническими системами при открытой разработке нагорных месторождений доломитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 68–74.
7. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: a case study from a polymetallic mine in South China / Z. Sun, X. Xie, P. Wang, Yu. Hu, H. Cheng // Science of the Total Environment. – 2018. – V. 639. – P. 217–227.
8. Environmental impacts of unmanaged solid waste at a former base metal mining and ore processing site (Kirki, Greece) / A. Liakopoulos, B. Lemiere, K. Michael, C. Crouzet, V. Laperche, I. Romaidis, I. Drougas, A. Lassin // Waste Management & Research. – 2010. – № 28. – P. 996–1009.
9. Environmental monitoring of soils of post-industrial mining areas / V. Pohrebennyk, P. Koszelnik, O. Mityasova, E. Dzhumelia, M. Zdeb // Journal of Ecological Engineering. – 2019. – V. 20. – Iss. 9. – P. 53–61.
10. Дягилева А.Г. Устойчивость к химическому загрязнению криоземов Западной Якутии: дис. ...канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2015. – 178 с.
11. Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. Heavy metals in cryozems of Western Yakutia // Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems conference proceedings. – Bulgaria, 2019. – V. 19. – B. 3.2. – P. 239–246.
12. Легостаева Я.Б., Ксенофонтова М.И., Дягилева А.Г. Эколого-геохимический мониторинг почвенного покрова в зоне воздействия Нюрбинского ГОКа // Горный журнал. – 2014. – № 4. – С. 117–120.
13. Bradl H.B. Heavy metals in the environment. Interface. In book: Science and Technology. – London: Elsevier Ltd., 2005. – 269 p.
14. Demkova L., Jezny T., Bobulska L. Assessment of soil heavy metal pollution in a former mining area – before and after the end of mining activities // Soil & Water Research. – 2017. – V. 12 (4). – P. 229–236.
15. Different exposure profile of heavy metal and health risk between residents near a Pb-Zn mine and Mn mine in Huayuan county, South China / Y. Du, L. Chen, P. Ding, B. Chen, Y. Duan // Chemosphere. – 2019. – V. 216. – P. 352–364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.14
16. Evaluation of heavy metal contamination of surface soils in Zarshouran gold district, Northwestern Iran / F. Ghazban, A. Parizanganeh, A. Zamani, S. Baniardalan // International Journal of environmental research. – 2018. – V. 12 (6). – P. 843–860.
17. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China / J. Wu, Y. Teng, S. Lu, Y. Wang, X. Jiao // PLoS ONE. – 2014. – V. 9. – Iss. 11. – P. e112917. DOI: 10.1371/journal.pone.0112917
18. Zhang J., Yao D. Geochemical characteristics and source analysis of soil heavy metals in Luling coal mine, northern Anhui Province // Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 189 (3). – P. 032058.
19. Вольперт Я.Л., Мартынова Г.А. Основные направления минимизации воздействия алмазодобывающей промышленности Якутии на окружающую среду // Горный журнал. – 2011. – № 1. – С. 100–102.
20. Макаров В.Н. Эколого-геохимическая оценка техногенного воздействия на окружающую среду Якутии // География и природные ресурсы. – 2010. – № 1. – С. 45–48.
21. Тентюков М.П. Особенности распределения химических элементов в мерзлых почвах // Криосфера Земли. – 2013. – Т. 17. – № 3. – С. 100–107.
22. Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. The stability of frozen soils in conditions of development of mining industry // Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems conference proceedings. – Bulgaria, 2017. – V. 17. – Iss. 32. – P. 655–662. DOI: 10.5593/sgem2017/32/S13.085
23. Legostaeva Ya.B. Migration of microelements in the profile of cryozem in north-west Yakutia // Life Science Journal. – 2014. – V. 11. – Iss. 7s. – P. 406–409.
24. Килижеков О.К., Толстов А.В. Закономерности образования и размещения промышленных россыпей алмазов в Накынском кимберлитовом поле (Якутская алмазоносная провинция) // Наука и образование. – 2017. – № 1. – С. 12–20.
25. Килижеков О.К., Толстов А.В. Новые возможности прироста запасов алмазов в Средне-Мархинском районе Якутии // Месторождения алмазов: процессы формирования, закономерности локализации, методы прогнозирования и поисков. Труды Рабочего совещания. – Новосибирск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского Отделения Российской академии наук, 2016. – С. 54–60.
26. Новое тело высокоалмазоносных кимберлитов в Накынском поле Якутской алмазоносной провинции / А.В. Толстов, В.А. Минин, В.Б. Василенко, Л.Г. Кузнецова, А.Н. Разумов // Геология и геофизика – 2009. – Т. 50. – № 3. – С. 227–240.

В 2018 г. по сравнению с 2007 г. содержание поллютантов в верхнем слое почвы значительно увеличилось. Состояние почвенного покрова промышленной площадки Нюрбинского горно-обогатительного комбината оценивается как высокоопасное ($Zc > 128$), что связано с увеличением промышленного производства и разработкой второго карьера кимберлитовой трубки «Ботуобинская».

Статья подготовлена в рамках выполнения проектов Государственного задания Минобрнауки РФ FSRG-2020-0018 «Изучение особенностей функционирования арктических и субарктических экосистем Якутии в условиях усиления техногенного воздействия и глобального изменения климата» и FUEM-2019-0003 «Эколого-геохимическое изучение техногенных массивов на территории Якутской алмазоносной провинции».

27. Оценка перспектив и локальное прогнозирование кимберлитов с помощью гис-технологий на закрытых территориях Нанькинского кимберлитового поля, Западная Якутия / П.А. Игнатов, К.В. Новиков, А.М. Шмонов, Р.В. Еремеев, Л.В. Лисковая, О.Е.Ковальчук, А.В. Толстов // Руды и металлы. – 2012. – № 4. – С. 54–60.
28. Коробков И.Г., Евстратов А.А., Мильштейн Е.Д. Базитовые вулканоструктуры алмазодобывающих районов восточного борта Тунгусской синеклизы. – Томск: STT, 2013. – 270 с.
29. Редакция. Крупнейшая отрасль крупнейшего субъекта федерации в крупнейшем экономическом районе // География. – 2008. – № 11. URL: <https://geo.1sept.ru/article.php?ID=200801117> (дата обращения 10.11.2020).
30. Дягилева А.Г. Экологическая оценка геохимического состояния техногенно-загрязненных почв // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2013. – № 8. – С. 53–55.
31. М 03-07-2009. Методика выполнения измерения массовой доли элементов (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) в пробах почв, грунтов и донных отложений ПНД Ф 16.1:2.2.2.63-09. – М., 2009. – 40 с.
32. Мотузова Г.В. Устойчивость почв к химическому воздействию. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 57 с.
33. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 275 с.
34. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территорий городов химическими элементами / под ред. Б.А. Ревич, Ю.Е. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 112 с.
35. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
36. Дягилева А.Г. Гумус как показатель устойчивости почв к химическому загрязнению // Гуминовые вещества в биосфере: VI Всероссийская научная конференция с международным участием. – Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2014. – С. 160–163.
37. Прохорова Н.В. Эколого-геохимическая роль автотранспорта в условиях городской среды // Вестник Самарского государственного университета: Естественнонаучная серия. – 2005. – № 5 (39). – С. 188–199.
38. Дягилева А.Г. Устойчивость к химическому загрязнению криоземов Западной Якутии: автореф. дис. ...канд. биол. наук. – Улан-Удэ, 2015. – 22 с.
39. Михальчук Н.В. Подвижные формы тяжелых металлов и микроэлементов в почвах карбонатного ряда юго-запада Беларуси // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2017. – № 3. – С. 90–97.
40. Свечникова А.А. Закономерности аккумуляции валовых и подвижных форм микроэлементов в почвах Астраханской области // Естественные науки. – 2013. – № 1 (42). – С. 23–28.
41. Дягилева А.Г., Легостаева Я.Б. Влияние техногенеза на экологическое состояние мерзлотных почв (на примере Нюрбинского ГОКа) // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 79–84.
42. Влияние техногенного воздействия на содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах / О.Я. Соколова, А.В. Стряпков, С.В. Антимонов, С.Ю. Соловьев // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2006. – Т. 2. – № 2. – С. 35–42.
43. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. – Boca Raton: CRS Press, 2011. – 548 p.
44. Легостаева Я.Б. Эколого-геохимическая характеристика наземных экосистем // Мониторинг состояния наземных и водных экосистем в зоне влияния Нюрбинского горно-обогатительного комбината: отчет о научно-исследовательской работе Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера Северо-Восточного федерального университета. Отв. исп. Я.Л. Вольперт – Якутск, 2018. – 235 с.

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Гололобова А.Г., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории мерзлотных почв Научно-исследовательского института прикладной экологии Севера им. проф. Д.Д. Саввинова Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова.

Легостаева Я.Б., кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

UDC 631.4:504.5:622.7

ECOGEOCHEMICAL MONITORING OF SOIL COVER ON DIAMOND MINING SITE IN WESTERN YAKUTIA

Anna G. Gololobova¹,
nuta0687@mail.ru

Yana B. Legostaeva²,
ylego@mail.ru

¹ M.K. Ammosov North-Eastern Federal University,
43, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russia.

² Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
39, Lenin avenue, Yakutsk, 677980, Russia.

The relevance of the study is caused by poor knowledge of the mining activities impact on the environment components in the conditions of permafrost distribution.

The main aim: geoecological monitoring of soil cover in the area of development of primary diamond deposits in Western Yakutia on the example of the industrial site of the Nyurbinsky mining and processing plant.

Objects: frozen soils of the north-taiga landscapes of Western Yakutia.

Methods: potentiometric, colorimetric, pipette, atomic absorption, statistical methods.

Results. The paper introduces the data on the state of the soil cover of the industrial site of the Nyurbinsky mining and processing plant for a ten-year period – 2007–2018. The geochemical series of distribution of chemical elements in decreasing order of their average values for the upper 0–20 cm soil layer is as follows: Mn>Zn>Ni>Cu>Co>Cr>Pb>As>Cd. A spatial increase in the contrast of technogenic anomalies was recorded, characterizing the active accumulation of mobile forms Mn (17 times), Zn (5 times), Cd (2,6 times), Cr (2 times), Co (1,8 times) and Ni (1,6 times) in the surface organogenic horizons of soils. The accumulation of Mn, Ni, Co is mainly caused by natural (typomorphic to kimberlite elements) and technogenic (aerogenic distribution of fine particles as a result of drilling and blasting operations, wind erosion of dumps) factors. The authors have identified positive correlations between the pairs Mn–Zn, Mn–Cd, Mn–Pb, Zn–Ni, Zn–Cd, Cr–Cu ($r \geq 0,5$), as well as the effect of organic matter on the content of Mn ($r=0,5$), and pH values for the content of Cr ($r=0,8$) and Cu ($r=0,5$). Maps of the ecological and geochemical conditions of the soil cover of the industrial site of the Nyurbinsky mining and processing plant were constructed. At present, more than 260 km² of the industrial site is characterized by a highly hazardous category of soil pollution with $Zc > 128$.

Key words:

Western Yakutia, quarries for diamond mining, kimberlite pipes, heavy metals, mobile forms of trace elements, frozen soils, total soil pollution.

The paper was prepared within the projects of the State Task of the Ministry of Education of the RF FSRG-2020-0018 «Studying the features of Yakutia arctic and subarctic ecosystems functioning under conditions of increasing man-made impact and global climate change» and FUEM-2019-0003 «Ecological and geochemical study of man-made arrays in the territory of Yakutia diamond-bearing province».

REFERENCES

- Belosheykina A.V., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Ecological and geochemical assessment of Sorsk mining and processing plant soil cover (republic of Khakassia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 1, pp. 44–53. In Rus.
- Evlampieva E.P., Panin M.S. Nakoplenie tsinka, medi i svintsia lishaynikom v rayone ugledobyvayushchego mestorozhdeniya «Karazhyra» [Accumulation of zinc, copper and lead by lichen in the area of the Karazhyra coal deposit]. *Vestnik tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, no. 314, pp. 196–200.
- Sorokina O.A., Kiselev V.I. Chemical pollution of soils in the area of development of Dzhaldinsky alluvial and ore deposits of gold (Amur region). *Ecology and Industry of Russia*, 2005, no. 7, pp. 24–28. In Rus.
- Basova I.A., Ioina M.A., Glukhova E.N. Geoekologicheskoe sostoyanie pochvennogo pokrova v gomopromyshlennykh regionakh [Geoecological condition of soil cover in mining regions]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta: nauki o zemle*, 2010, no. 1, pp. 16–20.
- Basova I.A., Ivatanova N.P., Kopylov A.B. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya pochv v regionakh s razvitym gornoy promyshlennostyu [Assessment of the ecological state of soils in regions with developed mining]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta: estestvennye nauki*, 2012, no. 1–2, pp. 14–16.
- Ismailov B.T. Tekhnologiya upravleniya prirodno-tekhnicheskimi sistemami pri otkrytoy razrabotke nagornyykh mestorozhdeniy dolomitov [Technology for managing natural-technical systems in open pit mining of dolomite deposits]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2011, no. 9, pp. 68–74.
- Sun Z., Xie X., Wang P., Hu Yu., Cheng H. Heavy metal pollution caused by small-scale metal ore mining activities: a case study from a polymetallic mine in South China. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 639, pp. 217–227.
- Liakopoulos A., Lemiere B., Michael K., Crouzet C., Laperche V., Romaidis I., Drougas I., Lassin A. Environmental impacts of unmanaged solid waste at a former base metal mining and ore processing site (Kirki, Greece). *Waste Management & Research*, 2010, vol. 28, pp. 996–1009.
- Pohrebennykh V., Koselnik P., Mitryasova O., Dzhumelia E., Zdeb M. Environmental Monitoring of Soils of Post-Industrial Mining Areas. *Journal of Ecological Engineering*, 2019, vol. 20, Iss. 9, pp. 53–61.
- Dyagileva A.G. Ustoychivost k khimicheskoy zagryazneniyu kriozemov Zapadnoy Yakutii. Dis. Kand. nauk [Resistance to chemical pollution of cryozems of Western Yakutia. Cand. Diss.]. Ulan-Ude, 2015. 178 p.
- Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. Heavy metals in cryozems of Western Yakutia. *Water Resources. Forest, Marine and Ocean*

- Ecosystems conference proceedings*, 2019, vol. 19, book 3.2, pp. 239–246.
12. Legostayeva Ya.B., Ksenofontova M.I., Dyagileva A.G. Ecological-geochemical monitoring of the soil cover in the influence zone of the Nyurba mining and processing integrated works. *Mining Journal*, 2014, no. 4, pp. 117–120. In Rus.
 13. Bradl H.B. Heavy metals in the environment. Interface. *Science and Technology*. London, Elsevier Ltd., 2005. 269 p.
 14. Demkova L., Jezny T., Bobul'ska L. Assessment of soil heavy metal pollution in a former mining area – before and after the end of mining activities. *Soil & Water Research*, 2017, vol. 12 (4), pp. 229–236.
 15. Du Y., Chen L., Ding P., Chen B., Duan Y. Different exposure profile of heavy metal and health risk between residents near a Pb-Zn mine and Mn mine in Huayuan county, South China. *Chemosphere*, 2019, vol. 216, pp. 352–364. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.10.14
 16. Ghazban F., Parizanganeh A., Zamani A., Baniardalan S. Evaluation of heavy metal contamination of surface soils in Zarshouran gold district, Northwestern Iran. *International Journal of environmental research*, 2018, vol. 12 (6), pp. 843–860.
 17. Wu J., Teng Y., Lu S., Wang Y., Jiao X. Evaluation of soil contamination indices in a mining area of Jiangxi, China. *PLoS ONE*, 2014, vol. 9, Iss. 11, pp. e112917. DOI: 10.1371/journal.pone.0112917
 18. Zhang J., Yao D. Geochemical characteristics and source analysis of soil heavy metals in Luling coal mine, northern Anhui Province. *Institute of Physics Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, vol. 189 (3), pp. 032058.
 19. Volpert Ya.L., Martynova G.A. The main directions of minimizing influence of diamond-bearing industry of Yakutia on environment. *Mining Journal*, 2011, no. 1, pp. 100–102. In Rus.
 20. Makarov V.N. Ecological and geochemical assessment of technogenic impact on the environment of Yakutia. *Geography and Natural Resources*, 2010, no. 1, pp. 45–48. In Rus.
 21. Tentyukov M.P. Features of distribution of chemical elements in frozen soils. *Earth's Cryosphere*, 2013, vol. 17, no. 3, pp. 100–107. In Rus.
 22. Gololobova A.G., Legostaeva Ya.B. The stability of frozen soils in conditions of development of mining industry. *Water Resources. Forest, Marine and Ocean Ecosystems conference proceedings*, 2017, vol. 17, Iss. 32, pp. 655–662. DOI: 10.5593/sgem2017/32/S13.085
 23. Legostaeva Ya.B. Migration of microelements in the profile of cryozem in north-west Yakutia. *Life Science Journal*, 2014, vol. 11, Iss. 7s, pp. 406–409.
 24. Kilizhekov O.K., Tolstov A.V. Laws of formation and placing of industrial placer diamonds in the Nakyn kimberlite field (Yakut diamondiferous province). *Science and education*, 2017, no. 1, pp. 12–20. In Rus.
 25. Kilizhekov O.K., Tolstov A.V. Novye vozmozhnosti prirosta zapasov almazov v Sredne-Markhinskom rayone Yakutii [New opportunities for increasing diamond reserves in the middle Markha district of Yakutia]. *Mestorozhdeniya almazov: protsessy formirovaniya, zakonornosti lokalizatsii, metody prognozirovaniya i poiskov. Trudy rabochego soveshchaniya* [Diamond deposits: formation processes, localization patterns, forecasting and prospecting methods. Meeting Proc.]. Novosibirsk, 2016. pp. 54–60.
 26. Tolstov A.V., Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Razumov A.N. A new body of highly diamondiferous kimberlites in the Nakyn field of the Yakutian kimberlite province. *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 227–240. In Rus.
 27. Ignatov P.A., Novikov K.V., Shmonov A.M., Ereemeev R.V., Lis-kovaya L.V., Kovalchuk O.E., Tolstov A.V. Estimation of the prospects and local prediction of kimberlites using gis-technology in closed areas of Nakyn kimberlite field, Western Yakutia. *Ores and Metals*, 2012, no. 4, pp. 54–60. In Rus.
 28. Korobkov I.G., Evstratov A.A., Milshtein E.D. *Bazitovye vulkanostrukturny almazonosnykh rayonov vostochnogo borta Tunguskoy sineklizy* [Basic volcanostructures of diamondiferous regions of the eastern side of the Tunguska syncline]. Tomsk, STT Publ., 2013. 270 p.
 29. Krupneyshaya otrasl' krupneyshego subekta federatsii v krupneyshem ekonomicheskom rayone [The largest industry of the largest federal subject in the largest economic region]. *Geografiya*, 2008, no. 11. Available at: <https://geo.lsept.ru/article.php?ID=200801117> (accessed 10 November 2020).
 30. Dyagileva A.G. Environmental assessment of geochemical state technogenic-contaminated soils. *International journal of applied and fundamental research*, 2013, no. 8, pp. 53–55.
 31. M 03-07-2009. *Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli elementov (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) v probakh pochv, 147 gruntov i donnykh otlozheniy PND F 16.1:2:2.2.63-09* [Procedure for measuring the mass fraction of elements (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, V, Zn) in samples of soils, 147 soils and bottom sediments PND F 16.1: 2: 2.2.63-09.]. Moscow, 2009. 40 p.
 32. Motuzova G.V. *Ustoychivost pochv k khimicheskoy vozdeystviyu* [Chemical resistance of soils]. Moscow, MGU Publ., 2000. 57 p.
 33. Syso A.I. *Zakonornosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri* [Patterns of distribution of chemical elements in parent rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2007. 275 p.
 34. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territoriy gorodov khimicheskimi elementami* [Guidelines for the geochemical assessment of pollution of urban areas with chemical elements]. Eds. B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova, E.P. Sorokina. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
 35. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy* [Geochemistry of the environment]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 335 p.
 36. Dyagileva A.G. Gumus kak pokazatel' ustoychivosti pochv k khimicheskoy zagryazneniyu [Humus as an indicator of soil resistance to chemical pollution]. VI *Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem. Guminovye veshchestva v biosfere* [VI All-Russian scientific conference with international participation. Humic substances in the biosphere]. Syktyvkar, Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2014. pp. 160–163.
 37. Prokhorova N.V. Ecological and geochemical role of vehicles in urban environments. *Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2005, no. 5 (39), pp. 188–199. In Rus.
 38. Dyagileva A.G. *Ustoychivost k khimicheskoy zagryazneniyu krio-zemov Zapadnoy Yakutii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Resistance to chemical pollution of cryozems of Western Yakutia. Cand. Diss. Abstract]. Ulan-Ude, 2015. 22 p.
 39. Mikhalechuk N.V. Mobile forms of heavy metals and trace elements in carbonate range soils of the southwest part of Belarus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series*, 2017, no. 3, pp. 90–97. In Rus.
 40. Svechnikova A.A. Content and forms of microelements found in the soil of Astrakhan region. *Problems of Regional Ecology and Nature Management*, 2013, no. 1 (42), pp. 23–28. In Rus.
 41. Dyagileva A.G., Legostaeva Ya.B. Influence of technogenesis on ecological condition of cryogenic soils (on the example of Nyurbinsky mining and processing combine). *Vestnik of North-Eastern Federal University. Series Earth Sciences*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 79–84. In Rus.
 42. Sokolova O.Ya., Stryapkov A.V., Antimonov S.V., Solovykh S.Yu. Influence of man-caused impact on content of gross and active forms of heavy metals in soil. *Vestnik of the Orenburg State University*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 35–42. In Rus.
 43. Kabata-Pendias A. *Trace elements in soils and plants*. 4th ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011. 548 p.
 44. Legostaeva Ya.B. *Ekologo-geokhimicheskaya kharakteristika nazemnykh ekosistem* [Ecological and geochemical characteristics of terrestrial ecosystems]. *Monitoring sostoyaniya nazemnykh i vodnykh ekosistem v zone vliyaniya NGOKa: otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote Nauchno-issledovatel'skogo instituta prikladnoy ekologii Severa Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta* [Monitoring the state of terrestrial and aquatic ecosystems in the zone of influence of the Nyurbinsky mining and processing plant: research report of Scientific Research Institute of Applied Ecology of the North, North-Eastern Federal University]. Responsible executor: Ya.L. Vol'pert. Yakutsk, 2018. 235 p.

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Anna G. Gololobova, Cand. Sc., senior researcher, M.K. Ammosov North- Eastern Federal University.

Yana B. Legostaeva, Cand. Sc., leading researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

УДК 550.389+504.06

МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ НА ПЛОЩАДКЕ ОБЪЕКТА МИРНОГО ПОДЗЕМНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА «КРИСТАЛЛ» (ЗАПАДНАЯ ЯКУТИЯ)

Артамонова Светлана Юрьевна¹,
artam@igm.nsc.ru

Кожевников Николай Олегович²,
KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Шейн Александр Николаевич^{2,3,4},
SheinAN@ipgg.sbras.ru

Новикова Полина Николаевна⁵,
polinagfz@gmail.com

Потапов Владимир Владимирович^{2,4},
PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Ушницкий Владислав Егорович⁶,
ushnitski@mail.ru

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

³ Научный центр изучения Арктики,
Россия, 629008, г. Салехард, ул. Республики, 20.

⁴ Забайкальский государственный университет,
Россия, 672039, Россия, г. Чита, ул. Александров-Заводская, 30.

⁵ Горный институт УрО РАН,
Россия, 614007, г. Пермь, Сибирская, 78а.

⁶ Министерство экологии, природопользования и лесного хозяйства РС (Я),
Россия, 677000, Якутск, ул. Дзержинского, 3/1.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью оценки текущей радиационной и геоэкологической обстановки и прогнозирования возможных сценариев развития на объектах мирных подземных ядерных взрывов, в первую очередь, расположенных вблизи населенных пунктов. Детализация строения геотехногенной системы «центр подземного ядерного взрыва – вмещающая геологическая среда – поверхность Земли» предусматривает проведение магнитных исследований, которые позволяют отделить геоэлектрические аномалии, вызванные погребенными железными объектами, от остальных, имеющих другую природу.

Цель: обнаружение и локализация погребенных железных объектов на объекте мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» по результатам наземной магнитной съемки.

Объектом исследования выбрана площадка боевой скважины мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл», произведенного 2 октября 1974 г. на глубине 98 м в мерзлых породах в 6,7 км от г. Удачный (Западная Якутия). Мощность взрыва составила 1,7 кт в тротиловом эквиваленте. В 1992 г. устье боевой скважины было засыпано обломочным материалом, в 2007 г. проведена дополнительная досылка. Диаметр насыпи (или саркофага) – около 260 м, высота – до 20 м.

Методы: наземная магнитная съемка протонным магнитометром ММРОС-1 с частотой отсчета 3 с, с геопривязкой точек с помощью GPS приёмника. Вариации магнитного поля регистрировались квантовым магнитометром GSM-19 с частотой 10 с в лесном участке около площадки объекта «Кристалл». При анализе данных использованы программные комплексы статистического и спектрально-корреляционного анализа географических «КОСКАД 3D» (авторы А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексахин) и численного моделирования PRIZMA (автор А.С. Долгаль).

Результаты. На основе базы данных из 5323-х точек измерения магнитного поля на площадке боевой скважины мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» размером 430×330 м построена карта аномального магнитного поля ΔТ_а. Выявлены магнитные аномалии разной интенсивности и размеров, источником которых являются погребенные железные объекты. Наиболее широкую и интенсивную аномалию диаметром в 46 м и амплитудой до 8000 нТл, расположенную над устьем боевой скважины, путем последовательной энергетической фильтрации удалось разложить на составляющие и соотнести их с фрагментами конструкции боевой скважины. Расчетные модели магнитных аномалий, формируемых вертикальным и субгоризонтальными фрагментами обсадной колонны боевой скважины, оказались близки к измеренным данным, тем самым подтвержден аддитивный характер магнитной аномалии над устьем боевой скважины. Остальные магнитные аномалии предположительно обусловлены фрагментами обсадных труб исследовательских буровых скважин, существовавших до взрыва на площадке, и технических труб, использованных при строительстве боевой скважины, хаотично перемещенных при взрыве.

Ключевые слова:

Наземная магнитная съемка, геоэкологические исследования, мирный подземный ядерный взрыв, Якутия.

Введение

С 1965 по 1988 гг. в рамках государственной программы СССР № 7 «Ядерные взрывы для народного

хозяйства» было проведено 124 мирных подземных ядерных взрыва (ПЯВ) общей мощностью 1783,7 кт в тротиловом эквиваленте [1]. Подобные эксперименты проводились в США, Франции и других странах.

В России объекты ПЯВ стали доступны для научной общественности после их рассекречивания в 1990-ые гг. В других странах, судя по росту публикационной активности, их широкое изучение началось в то же время. На [2] по ключевому слову «Underground nuclear explosion» за 1977–2019 гг. найдено всего 566 публикаций. До 1991 г. публиковалось в среднем по три работы в год, затем наблюдается резкий рост: в 1991–2012 гг. в среднем выходило по 15 работ в год, с 2013 г. – уже по 27 работ. Почти половина из 566 публикаций посвящена методикам распознавания ядерных испытаний: к ним можно отнести 248 работ, выделенных из выборки по ключевому слову «seismic», и 30 работ, выделенных по ключевому слову «gas transport», об изотопах благородных газов – индикаторах ПЯВ в атмосфере (таблица). Примерно четверть работ из оставшихся связана с радиогеохимическим изучением районов ПЯВ. Таким образом, объекты ПЯВ, как геотехногенные системы, рассматриваются в 200-х работах. Среди них по ключевому слову «TEM data» найдено две статьи, посвященные результатам зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) в 2008 г. на объектах ПЯВ «Кристалл» [3] и «Кратон-3» [4], выполненных сотрудниками ИГМ СО РАН и ИНГТ СО РАН. По ключевому слову «Geomagnetic» из выборки выделено четыре работы, посвященные оценке возмущения геомагнитного поля при ПЯВ. Публикаций по наземной или иной магнитной съемке объектов ПЯВ в корневой коллекции Web of Science [2] не найдено, и в этой области наши работы оказались пионерными. Это тем более неожиданно, потому что магнитная съемка успешно используется при поисках, распознавании и картировании подземных техногенных коммуникаций и объектов [5–10].

В России основное внимание исследователей уделялось радиационному воздействию ПЯВ на поверхностные ландшафты, радиоактивному загрязнению

почв, растений, водоемов [11–13]. Хотя некоторые исследователи изучали эффекты воздействия ПЯВ на геологическую среду [14–16], состояние недр большинства ПЯВ остается недостаточно изученным или вовсе неизученным.

Таблица. Анализ публикационной активности в области изучения ПЯВ в 1977–2019 гг. по данным [2]

Table. Analysis of publication activity of peaceful underground nuclear explosion (PUNE) study in 1977–2019 by [2]

№ выборки Sampling no.	ключевое слово key word		Число публикаций Quantity of publications
	Первое first	второе (уточняющее) second (clarifying)	
1		–	566
2		seismic	248
3		gas transport	30
4	underground nuclear explosion	U, Pu, ¹³⁷ Cs, ³ H	~33
5		water migration	42
6		aquifer	6 (3*)
7		geological	33
8		geophysical	21
9		TEM data	2*
10		geomagnetic	4

* соавторы: Кожеевников Н.О., Артамонова С.Ю.

* coauthors: Kozhevnikov N., Artamonova S.

Итак, небольшое количество публикаций по данной проблеме едва ли можно объяснить недостатком интереса к объектам ПЯВ. Возможно, до сих пор существуют ограничения для их широкого изучения. Такую ситуацию нельзя признать удовлетворительной, особенно с учетом того, что комплексное геоэкологическое изучение объектов ПЯВ может дать важную информацию для решения не менее важной проблемы захоронения радиоактивных отходов.



Рис. 1. Расположение объекта «Кристалл» (желтый кружок) и остальных ПЯВ на территории России (красные кружки). Условные обозначения распространения многолетней мерзлоты: 1 – сплошное, 2 – прерывистое, 3 – массивно-островное, 4 – островное и редкоостровное, 5 – реликтовое, 6 – мерзлота на шельфе, 7 – отсутствие многолетней мерзлоты; штриховой линией показан контур Сибирской платформы

Fig. 1. Sites of the PUNE in Russia (red marks) and the «Crystal» object (yellow mark). Legend of permafrost degree: 1 – continuous, 2 – sporadic, 3 – massive-insular, 4 – insular and rare insular, 5 – relict, 6 – shelf, 7 – non-frozen rocks; black dash-line – the contour of the Siberian platform

На территории России 51 из 85 ПЯВ были проведены в зоне многолетней мерзлоты, чувствительной к воздействию внешних факторов (рис. 1). Актуально изучение объектов ПЯВ, расположенных вблизи населенных пунктов, в районах интенсивной горнодобывающей деятельности. Для прогнозирования возможных сценариев развития геотехногенной системы «центр ПЯВ – вмещающая геологическая среда – поверхность Земли» необходимо проведение исследований с применением комплекса дистанционных методов. В условиях контрастной геоэлектрической среды криолитозоны для изучения объектов ПЯВ эффективно применение методов электроразведки. Для разделения геоэлектрических аномалий, вызванных погребенными железными объектами, и геоэлектрических аномалий, имеющих другую природу, электроразведочные исследования следует дополнять магнитной съемкой.

Целью наших исследований, результаты которых представлены в настоящей статье, было обнаружение и локализация погребенных железных объектов на объекте ПЯВ «Кристалл» по результатам наземной магнитной съемки.

Интенсивное развитие алмазодобычи и расположение поблизости г. Удачный делают изучение недр, где был проведен ПЯВ «Кристалл», особенно актуальным, что предопределило его выбор в качестве эталонного.

Краткая характеристика объекта ПЯВ «Кристалл»

ПЯВ «Кристалл» мощностью 1,7 кт в тротильном эквиваленте был произведен 02.10.1974 г. на глубине 98 м в мерзлых породах левого борта ручья Улахан-Бысытта в 6,7 км от г. Удачный (Западная Якутия). Это был единственный в СССР ПЯВ на рыхление и в этом отношении является уникальным. Для создания навалов общей длиной 1800 м, шириной по гребню 85 м, высотой 27–30 м, как основы для плотины хвостохранилища, планировалось по линейному ряду поперек долины ручья Улахан-Бысытта провести еще семь таких же взрывов. Однако навал ПЯВ «Кристалл» оказался высотой не более 14 м, т. е. гораздо ниже расчетной, что послужило официальной причиной для отказа от проведения остальных взрывов.

При строительстве боевой скважины ПЯВ «Кристалл» в ствол на глубину до 6 м было установлено шахтное направление из трубы длиной 6 м, диаметром в 142 см, толщиной металла в 12 мм. В него вкладывалась обсадная колонна диаметром 122 см, толщиной металла в 12 мм, состоящая из труб, соединенных высокотемпературной сваркой, на глубину до 38 м. Судя по параметрам, трубы соответствовали ГОСТ 10706-63 СССР: погонная масса трубы с диаметром 122 см составляла 357,5 кг/м, с диаметром 142 см – все 416,7 кг/м. Большой диаметр боевой скважины и обсадной колонны, по-видимому, был обусловлен размером взрывного устройства.

При взрыве верхняя часть обсадной колонны длиной 12 м оторвалась и была выброшена на поверхность навала. Этот фрагмент обсадной колонны, лежащий субгоризонтально, был сфотографирован во время посещения объекта правительственной комиссией Рес-

публики Саха (Якутия) в 1990 г. [17] (рис. 2, а). На заднем плане видны отвалы карьера кимберлитовой трубки «Удачная», т. е. объектив фотоаппарата был направлен на юго-запад, следовательно, фрагмент обсадной колонны, как можем судить, был ориентирован приблизительно по широте – на северо-западо-запад (рис. 2, б). В архивных документах данные о выходе на поверхность еще какого-либо другого фрагмента конструкции боевой скважины, кроме как о двенадцатиметровом фрагменте обсадной колонны, не приводятся.

В 1992 г. навал, образованный взрывом, был засыпан обломочным материалом; в 2007 г. была проведена дополнительная досыпка, в результате образовалась насыпь (саркофаг) диаметром 260 м, высотой до 20 м.

Район расположен в Якутской алмазодобывающей провинции на Сибирской платформе (рис. 1). Геологический разрез на глубину до 2200 м сложен известняками, доломитами и их глинистыми разностями. Верхний слой мощностью 150–200 м находится в многолетнемерзлом состоянии. Ниже располагаются три подземных водоносных горизонта, насыщенные напорными высокоминерализованными рассолами. В 2008 г. установлено вытекание из-под саркофага ПЯВ «Кристалл» солоноватых вод, содержащих хлориды и техногенные радионуклиды [18]. Впервые проведенные зондирования методом ЗСБ выявили локальную геоэлектрическую аномалию под эпицентром взрыва, которая в 2008 г. была объяснена подъемом подземных рассолов по ослабленной взрывом зоне [3]. При интерпретации данных ЗСБ не были учтены погребенные под насыпью железные объекты, например обсадная колонна боевой скважины. В связи с этим в 2019 г. нами проведена наземная магнитная съемка с целью поисков и оконтуривания железных объектов, учет которых необходим для построения геоэлектрической модели современного состояния недр, где в 1974 г. был проведен ПЯВ «Кристалл».

Экспериментальная часть: методика полевых измерений

Площадка боевой скважины ПЯВ «Кристалл» размером 430×330 м окружена забором из вкопанных металлических труб высотой до 2,5 м, соединенных металлической проволокой. На площадке были разбиты 30 профилей длиной 380 м (рис. 3) примерно с 10-метровым отступом от забора для предотвращения помех от него. Расстояние между профилями составляло 10 м. Измерения модуля полного вектора геомагнитного поля выполнены с помощью протонного магнитометра ММPOS-1, основанного на эффекте Оверхаузера (производство УГТУ-УПИ, Россия, Екатеринбург). Магнитная съемка осуществлялась путем равномерного перемещения по профилям, при этом оператор следовал за работником, задающим направление по приёмнику GPS (Garmin64st). Интервал между измерениями составлял 3 секунды, что соответствовал расстоянию примерно 2 м. Координаты каждой точки записывались GPS приёмником. Выполнено 5051 измерений при суммарной длине профилей около 11400 м. Проведено 288 контрольных замеров по двум профилям. Абсолютная погрешность измерений магнитометром ММPOS-1 составила 1 нТл.

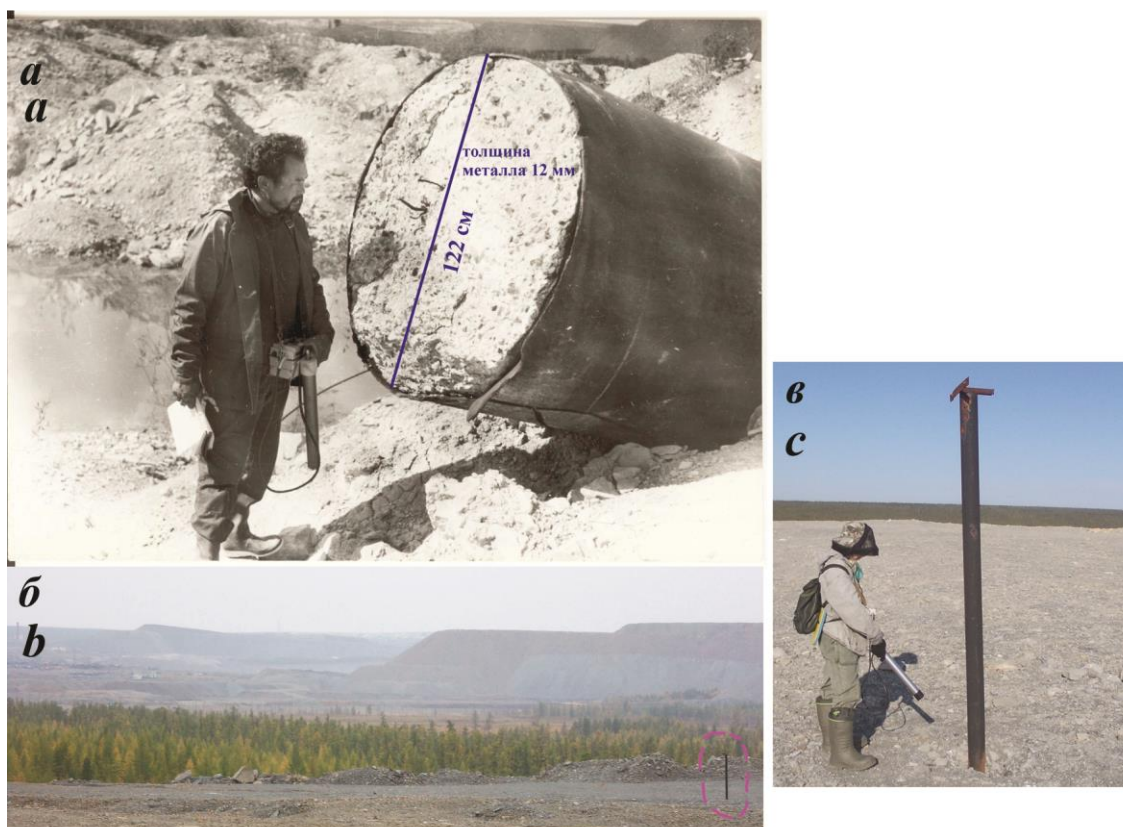
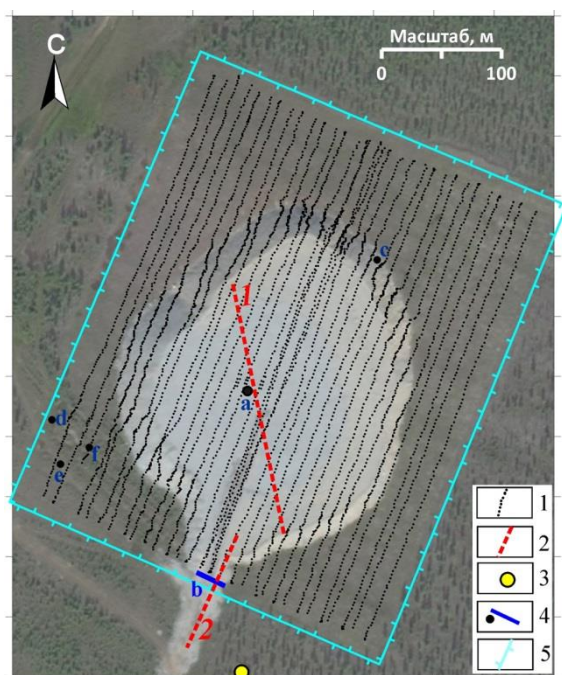


Рис. 2. а) фрагмент обсадной колонны с цементной пробкой длиной в 12 м, выброшенный взрывом на объекте «Кристалл» (фото И.Д. Архипова, с радиометром Е.С. Секов, 1990 г.) [17. С. 32]; б) вид с северо-восточной стороны насыпи ПЯВ «Кристалл» на отвалы карьера кимберлитовой трубки «Удачная» в 2019 г., столб-репер, установленный над устьем боевой скважины, обведен пурпурным штрихом; в) столб-репер (объектив направлен на север), рост человека 155 см

Fig. 2. a) cement-filled casing fragment of the emplacement hole of the «Crystal» (12 m long) (depicted by I.D. Arkhipov, E.S. Sekov with the radiometer is on the photo, 1990) [17. P. 32]; b) rock heaps of the kimberlite pipe «Udachnaya», view from the northern-east side of the «Crystal» PUNE mound in 2019, the benchmark of the emplacement hole contoured by purple dash-line; c) benchmark (view to north), human height is 155 cm



Для детализации параметров выявленных магнитных аномалий проведены дополнительные замеры по двум профилям (рис. 3, 4): 1) через центр саркофага с магнитного севера на юг длиной в 220 м с шагом между замерами 1 м; 2) в поперечном направлении через забор и две трубы, проложенные на поверхности Земли вдоль забора и присыпанные сверху рыхлым материалом дорожной насыпи толщиной около 1 м, с получением 53 дискретных данных.

Рис. 3. Схема наземной магнитной съемки на площадке объекта ПЯВ «Кристалл». Условные обозначения: 1 – треки замеров; 2 – детализационные профили № 1, 2; 3 – магнитовариационная станция; 4 – железные объекты на поверхности: а) столб-репер над устьем боевой скважины; б) две трубы под насыпью дороги для переброски склоновых стоков; в) шина от карьерного грузовика БЕЛАЗ; г) бочки; д) лист; е) проволока; 5 – забор вокруг площадки

Fig. 3. Land geomagnetic survey on the site of the PUNE «Crystal». Legend: 1 – measuring tracks; 2 – clarifying profiles no. 1, 2; 3 – geomagnetic variation station; 4 – iron objects on the land surface: a) benchmark; b) two water run-off tubs under the roadbed; c) car-tire of BELAZ truckful; d) barrels; e) sheet; f) wire; 5) paling of the site

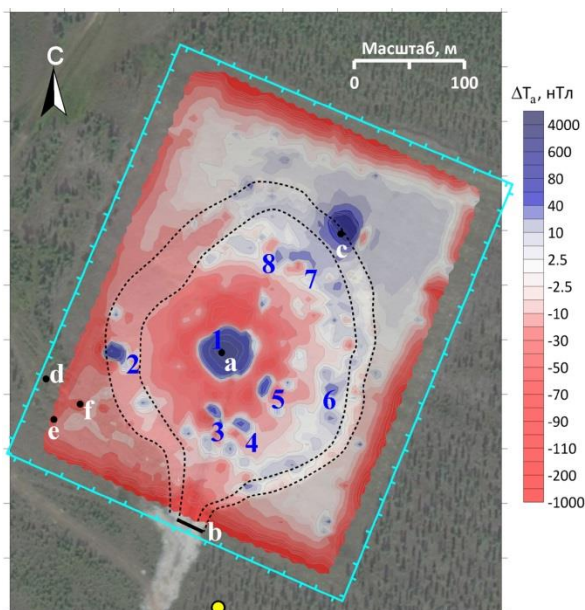


Рис. 4. Карта аномального магнитного поля на площадке ПЯВ «Кристалл» (нТл). Крупные и интенсивные магнитные аномалии пронумерованы (№ 1–8). Условные обозначения (a–f) железных объектов на поверхности площадки см. рис. 3. Штриховой линией показан контур насыпного саркофага (подножье и кромка верхней поверхности саркофага)

Fig. 4. Map of the anomalous geomagnetic field on the site of the PUNE «Crystal» (nTl). Wide and intensive anomalies numbered (no. 1–8). Legend of surface iron object (a–f) see Fig. 3. The PUNE «Crystal» mound contoured by dash-line (bottom and upper edge)

Учет вариации магнитного поля проводился на лесном участке около площадки «Кристалл» квантовым магнитометром GSM-19 (производство Gem System, Канада) с частотой 10 с (рис. 3). Абсолютная погрешность измерений прибора составила 0,1 нТл.

Методика обработки и интерпретации данных

Полевые данные наземной магнитной съемки площадки ПЯВ «Кристалл» систематизированы и собраны в базу данных, которая стала основой для подготовки статьи. При обработке данных использована программа Microsoft Office Excel 2007, для визуализации – Golden Software Surfer. Для анализа данных привлекался комплекс статистического и спектрально-корреляционного анализа геоданных «КОСКАД 3D» (авторы А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексахин) [19]. С использованием программного комплекса PRIZMA (автор А.С. Долгаль) [20] в первом приближении получены численные модели магнитных аномалий, формируемые вертикальным и субгоризонтальными фрагментами обсадной колонны боевой скважины.

Результаты

Построена карта аномального магнитного поля $\Delta T_a = T_{изм_i} - T_{вар_i}$, которое получено путем вычитания значений модулей полного вектора геомагнитного поля на магнитовариационной станции $T_{вар_i}$ и в точке

магнитной съемки $T_{изм_i}$, измеренных одновременно (рис. 4).

Проведена качественная интерпретация аномального магнитного поля. В первую очередь, выделим магнитные аномалии, вызванные техногенными объектами, расположенными на поверхности:

- слабые аномалии от железной бочки, железного листа и проволоки, обнаруженных на юго-западе площадки (объекты d, e, f, рис. 4);
- положительную изометричную аномалию с амплитудой в 800 нТл и диаметром до 25 м, создаваемую шиной от карьерного грузовика БЕЛАЗ, лежащей на северо-восточном подножье саркофага (объект c, рис. 4);
- вытянутые отрицательные аномалии по краям участка магнитной съемки, источником которых является забор из металлических столбов и колючей проволоки (показано контуром бирюзового цвета, рис. 4);
- интенсивную отрицательную аномалию, сформированную на южном крае площадки под совместным действием забора и двух труб, проложенных под насыпной дорогой на глубине примерно 1 м для переброски склоновых стоков, названную южной аномалией (объект b, рис. 4).

Особо выделяется интенсивная изометричная аномалия в центре саркофага. Она имеет положительный характер с амплитудой более 8000 нТл. В центральной части аномалии находится столб-репер, установленный над устьем боевой скважины с предположительной длиной около 4 м (рис. 2, c). Детализация центральной аномалии по профилю № 1 (рис. 3) показала, что на флангах аномалии: на северном – в интервале профиля от 8 до 64 м, на южном – в интервале от 134 до 170 м, наблюдается понижение модуля магнитной индукции с амплитудой 131 и 101 нТл до достижения отрицательных значений –114 и –55 нТл соответственно (рис. 5). В интервале от 77 до 121 м профиля аномальные значения магнитного поля выражены в виде резкого положительного пика с амплитудой 7700 нТл, который на 101-ом метре профиля, как раз у столба-репера, резко сменяется на узкий отрицательный пик с амплитудой 2400 нТл и шириной по его основанию всего в 4 м (в интервале 99–103 м профиля). Ширина центральной магнитной аномалии составляет 46 м, что совпадает с данными площадной съемки.

Детализационный профиль № 2 пересекает в поперечном направлении две трубы длиной около 30 м, проложенные рядом под дорожной насыпью на глубине примерно 1 м, и забор (рис. 3). Толщина металла труб равна 0,8 см, диаметр труб – 102 см: согласно ГОСТ погонная масса такой трубы составляет 201 кг/м. Южная магнитная аномалия, формируемая под совместным действием забора и этих двух железных труб определенной массы, геометрии и локализации, имеет форму «выраженный максимум с сопутствующими минимумами». При приближении с флангов на 10 м и ближе к трубам (и забору) наблюдается симметричное резкое снижение модуля магнитной индукции приблизительно на 400 нТл: от

примерно -50 до -450 нТл (рис. 5). Магнитная аномалия выражена в виде двух узких высокоамплитудных пиков: первый положительный с амплитудой

2050 нТл сменяется отрицательным пиком с амплитудой 6650 нТл. Поперечная ширина аномалии составляет всего $15,5$ м.

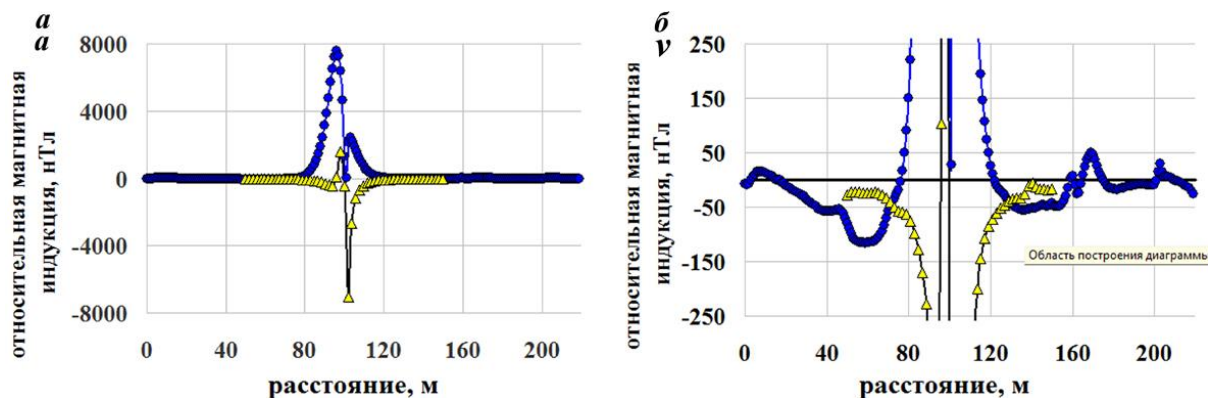


Рис. 5. Графики магнитных аномалий: центральной – по данным детализационного профиля № 1 (синие кружки), южной – по данным детализационного профиля № 2 (желтые треугольники) в мелком (а) и крупном (б) масштабах

Fig. 5. Small-scale (a) and large-scale (b) diagrams of the central geomagnetic anomaly by the data of the profile no. 1 (blue mark), of the southern geomagnetic anomaly by the data of the profile no. 2 (yellow mark)

Обсуждение

По данным детализационного профиля № 2 общая амплитуда южной аномалии составляет 8700 нТл, а ее ширина – $15,5$ м. По интенсивности южная и центральная аномалии сравнимы между собой. Заметим, что, если бы источником центральной аномалии был только столб-репер, она была бы не шире южной аномалии, сформированной под совместным влиянием таких же столбов – составляющих забора и двух крупных субгоризонтально расположенных труб диаметром 1 м. Но ширина центральной аномалии, равная 46 м, в 3 раза больше ширины южной аномалии. Кроме того, участки понижения магнитного поля на флангах центральной аномалии также существенно шире (58 м на северном фланге и 37 м на южном фланге) подобных участков у южной аномалии с шириной 10 – 14 м. Из этого можно заключить, что центральную магнитную аномалию формирует не только столб-репер, но и погребенные на значительно большей глубине, чем трубы южной аномалии, крупные железные объекты, по нашему мнению, несомненно, фрагменты обсадной колонны боевой скважины.

Отметим, что изометричная форма центральной аномалии дала нам повод усомниться в наличии под насыпью субгоризонтального фрагмента обсадной колонны, вылетевшего и лежавшего около устья боевой скважины [17], поскольку он вполне мог быть перемещен или удален до создания насыпи (саркофага) в 1992 г. Для верификации его наличия на месте была применена энергетическая фильтрация данных в программе «КОСКАД 3D» [19]. Путем выделения наиболее энергоемкой составляющей суммарного магнитного поля с последовательным ее вычитанием из исходного поля удалось разделить центральную аномалию на три составляющие (рис. 6):

а) наиболее энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля, формирующая положительную изометричную аномалию (до 2200 нТл);

б) умеренно-энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля, формирующая изометричную аномалию с положительными значениями в центре (до 1500 нТл) и отрицательными на ее периферии (до -400 нТл) с дальнейшим обратным плавным повышением значений (до 0 нТл);

с) слабо-энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля, формирующая субширотную линейную аномалию с двумя участками положительных значений, по периферии которых наблюдаются по два локальных участка отрицательных значений.

Известно, что источники различной геометрической формы образуют магнитные аномалии определенной морфологии [21]. Вместе с тем, наоборот, по форме магнитной аномалии можно судить об ее источнике. Мы попытались увязать составляющие центральной магнитной аномалии с железными фрагментами конструкции боевой скважины, известными по архивным документам, и даже сверх того – предположить произошедшие с ними изменения под воздействием взрыва. Известно, что при взрыве верхние 12 м обсадной колонны оторвало и выбросило на поверхность Земли (рис. 2) [17]. А нижняя часть (26 м) осталась в стволе боевой скважины: поднявшись под действием ударной волны со всем массивом горных пород вверх, по-видимому, опустилась обратно практически на исходное место, как и шестиметровое шахтное направление, оставшееся под землей. Мощность насыпи над устьем боевой скважины, исходя из полевых наблюдений, показаний GPS-навигатора и спутниковых данных, оценена примерно в 15 м. С учетом мощности насыпи и длины вытолкнутого из ствола фрагмента, верхняя кромка вертикального фрагмента обсадной колонны находится примерно на глубине 15 м + 12 м = 27 м, а интервал глубин его расположения в стволе боевой скважины составляет 27 – 53 м.

Наиболее энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля представляет собой изометричную положительную магнитную аномалию, плавно нисходящую от центра к периферии (рис. 6, а), и именно подобную аномалию формирует погруженное вертикальное цилиндрическое тело [21]. Следовательно, с большой долей уверенности эту составляющую можно соотнести с вертикальным фрагментом обсадной колонны длиной 26 м, оставшимся в стволе боевой скважины примерно на глубине 27–53 м.

Слабо-энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля имеет характерную форму аномалии для вытянутого горизонтального пласта (рис. 6, с), что указывает на присутствие 12-метрового субгори-

зонтального фрагмента обсадной колонны, погребенного под насыпью (рис. 2). Наличие на месте этого фрагмента подтверждает совпадение направления вытянутой стороны магнитной аномалии с априорными данными – с северо-западно-западной ориентацией этого фрагмента, установленной нами по фото 1990 г. (рис. 6, с) [17].

Умеренно-энергоемкую составляющую суммарного магнитного поля, ярко проявленную в виде контрастной изометричной аномалии с выраженной положительной центральной частью и сопутствующим периферийным минимумом (рис. 6, б), трудно сходу соотнести с каким-либо фрагментом боевой скважины, исходя из априорных данных.

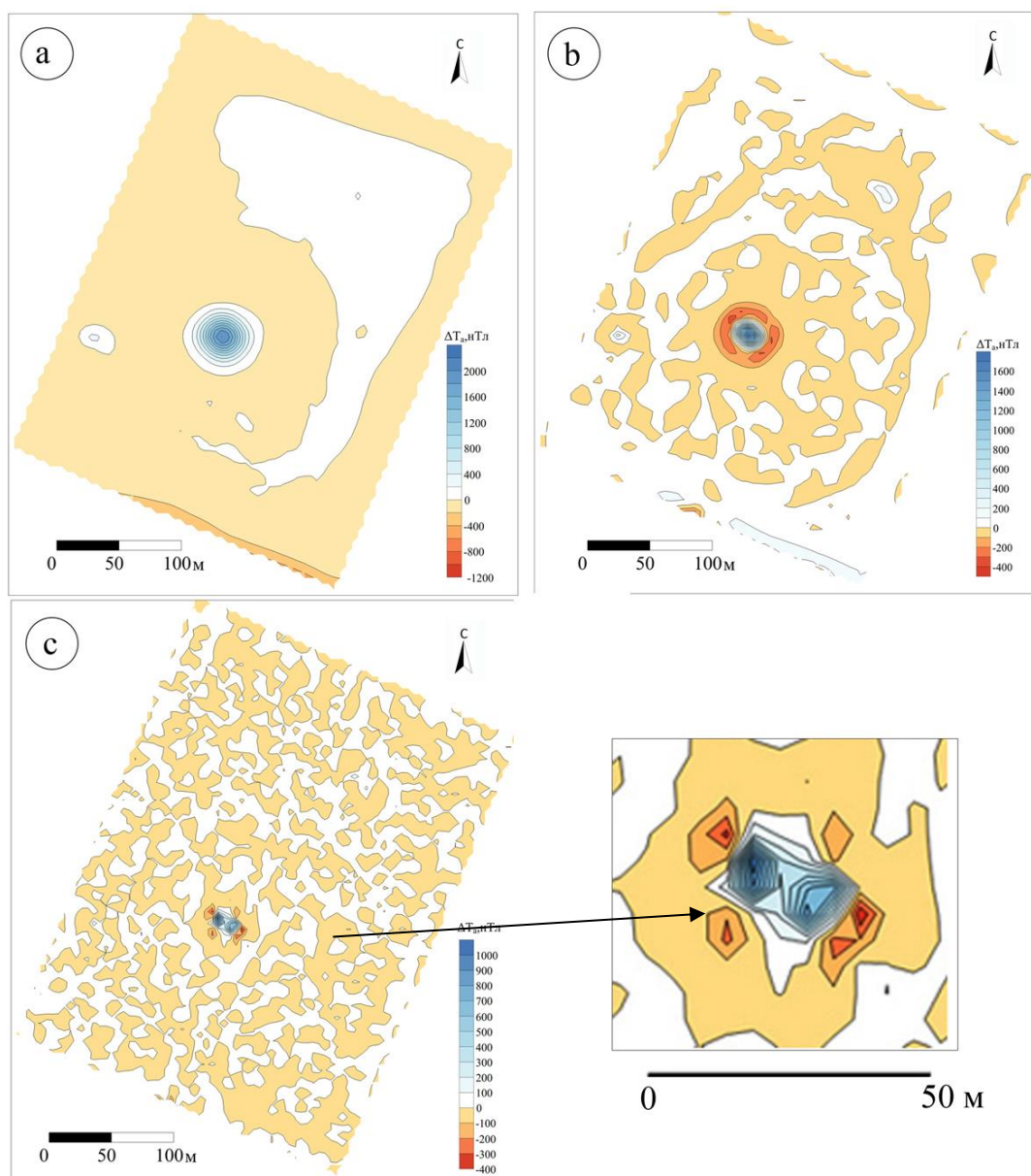


Рис. 6. Энергетическая фильтрация магнитного поля площадки ПЯВ «Кристалл»: а) наиболее энергоемкая; б) умеренно-энергоемкая; с) слабо-энергоемкая составляющие суммарного магнитного поля и его увеличенный вид (справа)

Fig. 6. Energetic filtration of geomagnetic field data of the site of PUNE «Crystal»: а) maximally energy capacious component of the geomagnetic field; б) moderate energy capacious component of the geomagnetic field; с) low energy capacious component of the geomagnetic field and its large-scale part (on the right)

Известно, что массивные кубы, ограниченные снизу цилиндры, а в идеале – шарообразные объекты формируют магнитные аномалии подобной морфологии [21]. Можно предположить, что основным источником умеренно-энергоемкой составляющей суммарного магнитного поля является массивный ограниченный снизу объект, по форме близкой к изометричной. И тут вспомним «шахтное направление» – укрепительную конструкцию в верхней части ствола боевой скважины (под ее устьем) из трубы длиной 6 м и диаметром 1,42 м, которая монтировалась в боковые рыхлые породы, по-видимому, с бетонированием и использованием железной арматуры, и поэтому являла собой более широкий и массивный объект, чем просто вертикальный цилиндр из трубы.

При взрыве ударная волна поднимает массив горных пород в виде купола, где каждая частица массива

двигается синхронно с другими, как при подъеме, так и при его обратном падении (рис. 7) [22]. На кинокадре примерно в 20 м над куполом взрыва ПЯВ «Кристалл» зафиксированы удлинненные объекты длиной 6–10 м при ширине основания купола в 200 м [17]. На основании форм и четких контуров этих объектов предполагаем, что это – металлические трубы. Отделение объектов от общего массива вещества купола можно объяснить только их дополнительным ускорением, по-видимому, под действием газов, прорвавшихся с большой силой из недр на ранних стадиях взрыва. Известно, что проектное просачивание газов предполагает их более спокойное истечение на поздней стадии ПЯВ [22]. Таким образом, этот кинокадр становится доказательством, что сильный поток газов из недр вырывался на ранней стадии взрыва.

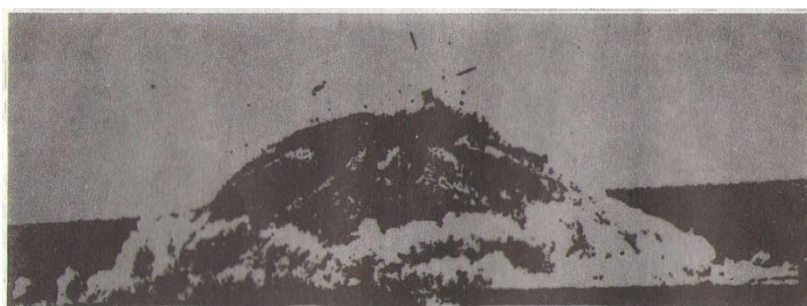


Рис. 7. Кадр из киносъемки ПЯВ «Кристалл» (примерно 4,5 с после начала взрыва, купол уже падает) [17]

Fig. 7. Film frame of the PUNE «Crystal» (about 4,5 sec after explosion starting, the cupola of explosion being fall) [17]

Впрочем, на мощный поток газов в момент взрыва указывает выталкивание практически 1/3 обсадной колонны (12 м) из ствола скважины на поверхность (рис. 2). При этом шахтное направление оставалось в стволе. Следовательно, поток газа проходил по узкому пространству между обсадной колонной и шахтным направлением и действовал не только на разрыв и выталкивание фрагмента обсадной колонны, но и в боковом направлении, расширяя проход, в том числе деформируя (скорее всего, раздувая) трубу шахтного направления, что, по-видимому, сделало шахтное направление более изометричным. И тогда умеренно-энергоемкую составляющую суммарного магнитного поля, ярко проявленную в виде контрастной изометричной аномалии с выраженной положительной центральной частью и сопутствующим периферийным минимумом, можно соотнести с шахтным направлением с новой деформированной поствзрывной формой, залегающим в верхней части ствола боевой скважины примерно на глубине 18–24 м.

Таким образом, общие рассуждения и анализ априорных данных позволили с большой долей вероятности соотнести непонятную вначале умеренно-энергоемкую составляющую с реальным железным объектом и даже качественно оценить его деформацию при взрыве.

Пространственное совмещение трех составляющих магнитного поля, выделенных последовательной энергетической фильтрацией, показало практическое

совмещение центров двух изометричных аномалий, что указывает на нахождение вертикального фрагмента обсадной колонны и шахтного направления в стволе боевой скважины (рис. 8). В пределах контуров этих магнитных аномалий располагается билатеральная аномалия от субгоризонтального фрагмента, что подтверждает его расположение рядом с устьем боевой скважины. Следовательно, можем говорить об отсутствии какого-либо значимого пространственного разнosa фрагментов конструкции боевой скважины относительно друг друга.

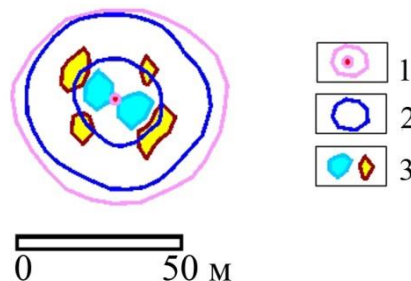


Рис. 8. Пространственно-совмещенные контуры наиболее энергоемкой (1), умеренно- (2) и слабо-энергоемкой составляющих (3) магнитного поля центральной аномалии объекта «Кристалл»

Fig. 8. Contours of spatial-coinciding of the maximal (1), moderate (2) and low (3) energy capacious components of the geomagnetic field of the central anomaly of the «Crystal» object

Необходимо подчеркнуть, что соотнесение составляющих суммарного магнитного поля с конкретным железным фрагментом конструкции боевой скважины указывает только на доминирующую роль этого фрагмента в формировании данной составляющей, но не исключает влияние остальных, в том числе неучтенных локальных железных объектов, расположенных в пределах центральной магнитной аномалии. Отметим, при энергетической фильтрации вклад столба-репера в суммарную магнитную аномалию не удалось выделить, возможно, в силу его чрезвычайной локальности, поскольку при полевых замерах он проявлялся в виде очень узкого и интенсивного отрицательного пика: с шириной по основанию всего в 4 м, с амплитудой 2400 нТл (рис. 5).

С применением программы PRIZMA [20] рассчитаны численные модели магнитных аномалий, формируемых фрагментами обсадной колонны боевой скважины, основные физические параметры и размеры которых известны по архивным и опубликованным данным [17], а их приблизительное положение определено нами на основе измеренных и априорных данных. Ниже рассмотрим эти модели:

1. Модель магнитного поля от фрагмента обсадной колонны, оставшегося в стволе боевой скважины на глубине 27–53 м в вертикальном положении длиной (высотой) 26 м, с эффективной намагниченностью $J_{\text{эф}}=40$ А/м (рис. 9, а). Вектор эффективной намагниченности был принят вертикальным. В итоге получена слабая положительная и изометричная в плане магнитная аномалия с максимальной амплитудой 7,5 нТл, которая по форме и по размерам весьма похожа на экспериментальные данные – на наиболее энергоемкую составляющую центральной магнитной аномалии с амплитудой до 2000 нТл, соотнесенную с вертикальным 26-метровым фрагментом боевой скважины (рис. 6, а), но по интенсивности значительно – почти в 250 раз – слабее. Значительное расхождение между расчетными и экспериментальными данными, возможно, обусловлено тем, что:
 - реальная масса вертикального фрагмента значительно выше массы, заложенной в расчеты, возможно, из-за наличия неучтенных объектов внутри или рядом;
 - вклад шахтного направления в наиболее энергоемкую составляющую измеренного магнитного поля более значителен, чем мы полагали (как уже отмечали, что соотнесение составляющих суммарного магнитного поля с конкретным железным фрагментом конструкции боевой скважины указывает только на доминирующую роль этого фрагмента в формировании данной составляющей, но не исключает влияние остальных);
 - существуют еще другие упущенные нами при моделировании обстоятельства.

Расхождение между моделью и измеренными данными в части аномалии от вертикального фрагмента обсадной колонны может быть снижено путем подбора расчетных вариантов.

2. Модель магнитного поля от субгоризонтального фрагмента длиной 12 м, расположенного на глубине 15 м в субширотном направлении, с эффективной намагниченностью $J_{\text{эф}}=40$ А/м (рис. 9, б1). Дополнительно был рассмотрен вариант модели при расположении фрагмента трубы на глубине 24 м (рис. 9, б2). Вектор эффективной намагниченности был принят также вертикальным. В результате получена модель магнитной аномалии с амплитудой до 6500 нТл, где в центральной части выделяется билатеральная субширотная аномалия с положительными, по периферии – с отрицательными значениями (рис. 9, б1). Численная модель как по форме, так и по размеру подходит на слабо-энергоемкую составляющую измеренного магнитного поля, соотнесенную нами с погребенным субгоризонтальным фрагментом обсадной колонны (рис. 6, с), также разница интенсивности расчетной и экспериментальной аномалий невысокая – примерно в 6,5 раз расчетная получилась выше. При погружении железного фрагмента на глубину до 24 м расчетная магнитная аномалия становится немного шире, более изометричной, с более плавными переходами, ее интенсивность снижается (до 4500 нТл), при этом в целом билатеральность аномалии сохраняется (рис. 9, б2). Видно, что интенсивность второго варианта численной модели получилась ближе к измеренным данным магнитной аномалии.

Таким образом, численное моделирование подтвердило верность соотнесения слабо-энергоемкой составляющей центральной магнитной аномалии именно с субгоризонтальным фрагментом обсадной колонны. Следующим шагом стало суммирование моделей магнитного поля а и б2, создаваемого источниками – вертикальным 26-метровым и субгоризонтальным 12-метровым фрагментами обсадной колонны (рис. 9, с). Суммарная аномалия по форме и амплитуде (до 4000 нТл) оказалась довольно близка к экспериментально измеренной центральной аномалии (аномалия 1, рис. 4). На карте разности измеренного магнитного поля и суммарного расчетного поля (рис. 9, д) в центральной части изометричной положительной магнитной аномалии отобразилась очень локальная, но весьма контрастная отрицательная аномалия с опережающими положительными значениями, которая, по-видимому, соответствует магнитной аномалии от поверхностного столба-репера.

Итак, численные модели и последовательная энергетическая фильтрация показали, что крупная изометричная центральная магнитная аномалия формируется под действием нескольких железных фрагментов, в том числе субширотного-ориентированного субгоризонтального фрагмента обсадной колонны, погребенного под саркофагом (рис. 10). Дальнейшее численное моделирование позволит уточнить глубину расположения вертикального 26-метрового фрагмента обсадной колонны в стволе боевой скважины и, вероятно, другие параметры объекта, также проверить наше предположение о расположении шахтного

направления, состоявшего из шестиметровой трубы, деформированной при взрыве, в диапазоне глубин 18–24 м, путем подбора оптимальных моделей.

Помимо рассмотренной центральной магнитной аномалии (№ 1, рис. 4) на саркофаге существует множество локальных магнитных аномалий, погребенные источники которых неизвестны. Наиболее крупные и интенсивные из этих аномалий пронумерованы на карте (рис. 4, № 2–8). Сделано предположение, что эти магнитные аномалии могут быть вызваны остатками обсадных труб буровых скважин и технологических труб. Перед проведением ПЯВ в 1973–1974 гг. для ис-

следовательских целей на площадке «Кристалл» были пробурены три скважины глубиной 68,7; 74,5 и 153 м, обсаженные только в верхней части – в интервале 0–18 м. Чуть раньше здесь были пробурены еще две геологические скважины глубиной 11–12 м. То есть существовало пять обычных буровых скважин, исходное местоположение которых известно (рис. 11). При строительстве боевой скважины для подачи цемента для забивки ствола и заколонного пространства использовались металлические трубы, и, судя по кинокадрам, при взрыве первыми, по-видимому, были выброшены из земли именно эти трубы (рис. 7) [17].

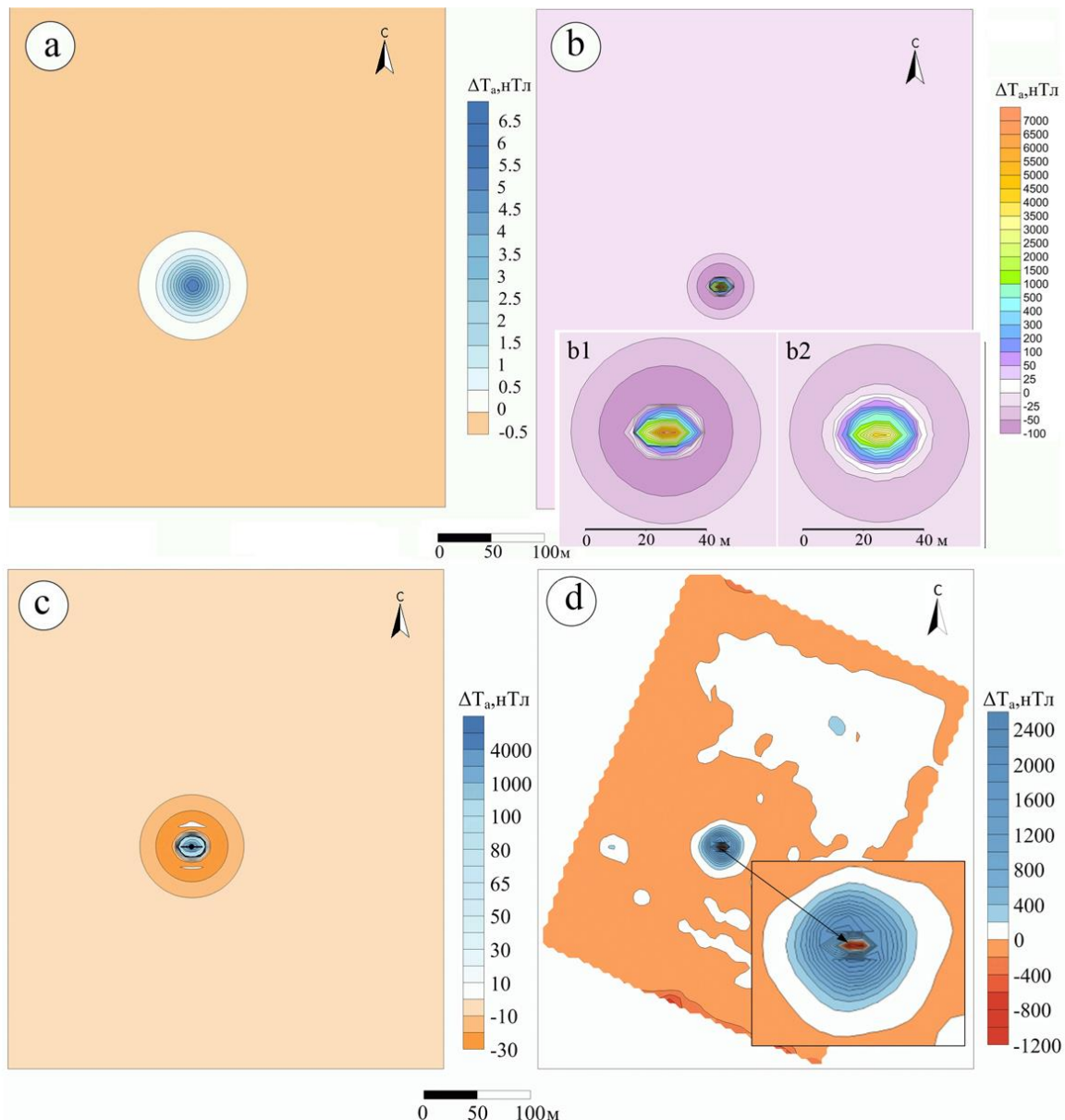


Рис. 9. Расчетные магнитные аномалии: а) для вертикального 26-метрового фрагмента обсадной колонны; б) для субгоризонтального фрагмента обсадной колонны: при залегании на глубине 15 м (b1), при его погружении на глубину 24 м (b2); в) суммарная магнитная аномалия двух моделей – а и b2; г) разность измеренного магнитного поля на площадке ПЯВ «Кристалл» и суммарной магнитной аномалии

Fig. 9. Computing models of magnetic anomalies: а) for vertical 26 m long casing fragment; б) for sub-horizontal 12 m long casing fragment: in 15 m depth (b1), in 24 m depth (b2); в) summary anomaly of two models – а and b2; г) difference between experimental geomagnetic field data and summary anomaly

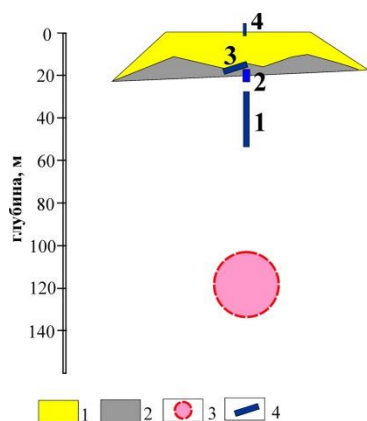


Рис. 10. Схема расположения железных фрагментов конструкции боевой скважины ПЯВ «Кристалл» в разрезе. Условные обозначения: 1 – саркофаг – насыпь из обломков пустой породы (известняков и доломитов); 2 – навал, сформировавшийся при взрыве; 3 – центр взрыва; 4 – источники магнитного поля: 1 и 3 – фрагменты обсадной колонны, 2 – труба шахтного направления, 4 – столб-репер над устьем боевой скважины

Fig. 10. Situation scheme (vertical cut) of iron fragments of the PUNE «Crystal» emplacement hole. Legend: 1 – the mound, constructed from rock debris (dolomites and limestone); 2 – the hill, formed due to the PUNE «Crystal»; 3 – PUNE centre; 4 – iron sources of magnetic anomalies: 1 and 3 – casing fragments, 2 – cellar pit, 4 – benchmark of the emplacement hole

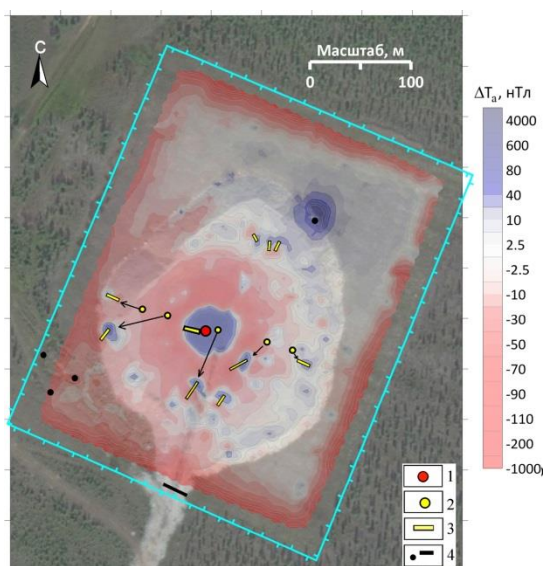


Рис. 11. Положение скважин до взрыва и предполагаемое перемещение обсадных труб этих скважин при взрыве. Условные обозначения: 1 – боевая скважина; 2 – скважины (до взрыва); 3 – обсадные трубы (слева у устья боевой скважины – фрагмент ее обсадной колонны); 4 – поверхностные железные объекты (см. рис. 3).

Fig. 11. Location of prospecting wells in the site before PUNE «Crystal» and supposed moving of their casing under the action of explosion. Legend: 1 – emplacement hole; 2 – prospecting wells (before explosion); 3 – casing fragments of wells (near the emplacement hole – the sub-horizontal fragment of its casing); 4 – iron objects on the land surface

Сделана попытка увязать локальные магнитные аномалии с буровыми скважинами: на рис. 11 показано положение скважин до взрыва (желтыми кружками) и возможное положение их обсадных труб после взрыва по результатам магнитной съемки. Хаотичное расположение объектов может быть объяснено тем, что ядерный взрыв – стадийный процесс, что влечёт в некотором смысле необъяснимое теорией обычного взрыва расположение поднятого материала.

Выводы

Результаты впервые проведенных исследований магнитного поля на площадке боевой скважины ПЯВ «Кристалл» позволяют сделать следующие выводы:

1. На площадке ПЯВ «Кристалл» существует ряд магнитных аномалий разной интенсивности и размеров, среди которых самой широкой и наиболее интенсивной является центральная изометричная в плане аномалия диаметром 46 м и амплитудой 8000 нТл, расположенная над устьем боевой скважины.
2. Детализация измерений и сравнение с магнитной аномалией, сформированной приповерхностными железными объектами, показало, что центральная аномалия формируется не только столб-репером, установленным на поверхности саркофага, но и крупными погребенными железными объектами – фрагментами конструкции боевой скважины.
3. Последовательная энергетическая фильтрация измеренных данных магнитного поля и численное моделирование подтвердили наличие на месте двенадцатиметрового фрагмента обсадной колонны, вытолкнутого при взрыве, субгоризонтально залегающего под насыпью около устья боевой скважины на глубине примерно 15 м, ориентированного в субширотном (северо-западно-западном) направлении;
4. Три составляющие центральной магнитной аномалии, выделенные последовательной энергетической фильтрацией, соотнесены с их основными источниками – погребенными фрагментами конструкции боевой скважины:
 - слабо-энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля билатеральной морфологии соотнесена с субгоризонтальным двенадцатиметровым фрагментом обсадной колонны боевой скважины;
 - основным источником умеренно-энергоемкой составляющей суммарного магнитного поля, представленной в виде контрастной изометричной аномалии с выраженной положительной центральной частью и сопутствующим периферийным минимумом, является предположительно деформированное (раздутое) газовым потоком, вырвавшимся из недр на ранней стадии подземного ядерного взрыва, и ставшее более изометричным массивное шахтное направление, состоящее из шестиметровой трубы с исходным диаметром 1,42 м и крепежной арматуры;

- наиболее энергоемкая составляющая суммарного магнитного поля в виде изометричной положительной магнитной аномалии формируется вертикальным 26-метровым фрагментом обсадной колонны, расположенным в стволе боевой скважины.
 - 5. Опираясь на априорные архивные данные и результаты энергетической фильтрации, проведено численное моделирование двух фрагментов обсадной колонны боевой скважины, которое показало аддитивный характер центральной магнитной аномалии, формируемой тремя погребенными фрагментами конструкции боевой скважины: одним субгоризонтальным и двумя – в стволе боевой скважины. Кроме того, присутствует локальный вклад столба-репера, установленного на поверхности насыпи (саркофага).
 - 6. Ранний выход мощного потока газа через околоствольное пространство боевой скважины смог вытолкнуть не только верхний двенадцатиметровый фрагмент обсадной колонны на поверхность, но мог и сдвинуть оставшийся фрагмент вверх относительно боковых пород. А обрушение полости взрыва, происходящее обычно через много часов, сутки после взрыва, наоборот, могло привести к углублению фрагмента обсадной колонны вместе с окружающим массивом горных пород. При дальнейшем численном моделировании путем подбора оптимальных моделей можно будет уточнить глубину расположения как вертикального фрагмента обсадной колонны, так и шахтного направления боевой скважины и, возможно, другие параметры объектов.
 - 7. Источником малоинтенсивных и локальных магнитных аномалий, предположительно, являются фрагменты обсадных труб исследовательских буровых скважин, существовавших до взрыва на площадке, и технических труб, использованных при обустройстве боевой скважины, хаотично перемещенных при взрыве.
- Первичные данные наземной магнитной съемки площадки объекта ПЯВ «Кристалл» систематизированы в базу данных [23] и могут быть доступны каждому при обращении в ИГМ СО РАН к С.Ю. Артамоновой.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-45-140020, РФФИ 19-05-00654А по государственному заданию ИГМ СО РАН и ИНГТ СО РАН, по государственному заказу № Ф.2019.473808 в рамках программы «Обеспечение экологической безопасности, рационального природопользования и развитие лесного хозяйства РС (Я) на 2018–2022 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мирные ядерные взрывы: обеспечение общей и радиационной безопасности при их проведении / под рук. В.А. Логачева. – М.: ИздАТ, 2001. – 512 с.
2. Поисковая интернет-платформа баз данных публикаций в научных журналах и патентов. URL: <http://apps.webofknowledge.com> (дата обращения 05.03.2020).
3. The geoelectric structure at the site of «Crystal» underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data / N.O. Kozhevnikov, E.Yu. Antonov, S.Yu. Artamonova, A.E. Plotnikov // Russian Geology and Geophysics. – 2012. – V. 53. – Iss. 2. – P. 185–193. URL: <http://www.ipgg.sbras.ru/science/publications/publ-the-geoelectric-structure-at-the-site-of-crystal-047075> (дата обращения 25.10.2020).
4. Artamonova S.Yu., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Permafrost and ground water settings at the site of «Kraton-3» peaceful underground nuclear explosion (Yakutia), from TEM data // Russian Geology and Geophysics. – 2013. – V. 54. – Iss. 5. – P. 555–565. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S106879711300076X> (дата обращения 25.10.2020).
5. Directional location of buried objects using three-component magnetic borehole data demonstrated for the case of a drill string / S. Ehmann, C. Virgil, A. Hördt, M. Leven // Geophysical Journal International. – 2016. – V. 205. – Iss. 3. – P. 1916–1925. URL: <https://academic.oup.com/gji/article/205/3/1916/658837> (дата обращения 25.10.2020).
6. Ayad A., Bakkali S. Analysis of the magnetic anomalies of buried archaeological ovens of Am Kerouach (Morocco) // International Journal of Geophysics. – 2018. – V. 2018. – ID 9741950. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijge/2018/9741950/> (дата обращения 25.10.2020).
7. Archaeological prospections in the Roman vicus Belgium (Rhineland-Palatinate, Germany) / W.-R. Teege, R. Cordie, Ph. Over, S. Magdefessel, R. Retzlaff, J. Stoffels // E&Q Quaternary Science Journal. – 2019. – V. 68. – Iss. 1. – P. 5–11. URL: <https://egqs.copernicus.org/articles/68/5/2019/> (дата обращения 25.10.2020).
8. Localized geomagnetic field anomalies in an underground gas storage / Z. Wang, B. Chen, J. Yuan, F. Yang, L. Jia, C. Wang // Physics of the Earth and planetary interiors. – 2018. – V. 283. – P. 92–97. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031920118300943?via%3Dihub> (дата обращения 25.10.2020).
9. Beggan C.D., Billingham L., Clarke E. Estimating external magnetic field differences at high geomagnetic latitudes from a single station // Geophysical prospecting. – 2018. – V. 66. – Iss. 6. – P. 1227–1240. URL: <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12641> (дата обращения 25.10.2020).
10. Novikova P.N. Application of detailed magnetics in intensive industrial noise conditions // Practical and theoretical aspects of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. Springer Proceedings in the Earth and Environmental Sciences. – 2019. – P. 371–376. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-97670-9_43 (дата обращения 25.10.2020).
11. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Kraton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia) / A.D. Gedeonov, E.R. Petrov, V.G. Alexeev, I.N. Kuleshova, M.L. Savopulo, I.S. Burtsev, V.Yu. Shkroev, V.I. Arkhipov // J. Environ. Radioact. – 2002. – № 60. – P. 221–234. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X01001059?via%3Dihub> (дата обращения 25.10.2020).
12. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review / V. Ramzaev, A. Mishine, V. Golikov, T. Argunova, V. Ushnitski, A. Zhuravskaya, P. Sobakin, J. Brown, P. Strand // J. Environ. Radioact. – 2009. – V. 100. – Iss. 12. – P. 1092–1099. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X09000782?via%3Dihub> (дата обращения 25.10.2020).
13. Sobakin P.I., Ushnitskii V.E., Perk A.A. Radioecological situation in the region of Gorizont-4 underground nuclear explosion in Sakha Republic (Yakutia) // Radiochemistry. – 2019. – V. 61. – Iss. 3. – P. 365–372. URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS1066362219030123> (дата обращения 25.10.2020).
14. Голубов Б.Н. Последствия техногенной дестабилизации недр Астраханского газоконденсатного месторождения в зоне подземных ядерных взрывов // Геоэкология. – 1994. – № 4. – С. 25–42.
15. Стогний В.В., Васильев С.П., Невольских С.Г. Изменения геофизических полей при подземных ядерных взрывах в Западной Якутии // Геофизические исследования в Якутии. – Якутск: ЯГУ, 1998. – С. 153–165.

16. Микуленко К.И., Чомчоев А.И., Готовцев С.П. Геолого-географические условия проведения и последствия подземных ядерных взрывов на территории Республика Саха (Якутия). – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 196 с.
17. Бурцев И.С., Колодезникова Е.Н. Радиационная обстановка в алмазоносных районах Якутии (препринт). – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 1997. – 52 с. URL: <https://yadi.sk/i/Kmp2f2-scGdTLw> (дата обращения 25.10.2020).
18. Геоэкологическая модель района мирного подземного ядерного взрыва «Кристалл» (Якутия) / С.Ю. Артамонова, Л.Г. Бондарева, Е.Ю. Антонов, Н.О. Кожевников // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 2. – С. 143–158. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17699401> (дата обращения 25.10.2020).
19. Coscad3D.ru. URL: www.coscad3d.ru (дата обращения 05.03.2020).
20. Долгаль А.С. Влияние сферичности Земли на результаты аэромагнитных измерений над платобазальтами (на примере Норильского района) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – V. 33. – № 11. – P. 26–33. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41469499> (дата обращения 25.10.2020).
21. Магниторазведка: Справочник геофизика / под ред. Б.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 470 с.
22. Адушкин В.В., Спивак А.А. Подземные взрывы. – М.: Наука, 2007. – 579 с.
23. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621125. – М.: Роспатент, 02.07.2020. URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020621125&TypeFile=html (дата обращения 25.10.2020).

Поступила 18.11.2020 г.

Информация об авторах

Артамонова С.Ю., доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Шеин А.Н., кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ведущий научный сотрудник Научного центра изучения Арктики; доцент кафедры прикладной геологии и технологии геологической разведки Забайкальского государственного университета.

Потапов В.В., кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН; доцент кафедры прикладной геологии и технологии геологической разведки Забайкальского государственного университета.

Кожевников Н.О., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

Новикова П.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Горного института УрО РАН.

Ушницкий В.Е., главный специалист Министерства экологии, природопользования и лесного хозяйства РС (Я).

UDC 550.389+504.06

MAGNETIC ANOMALIES AT THE SITE OF THE PEACEFUL UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSION «CRYSTAL» (WESTERN YAKUTIA)

Svetlana Yu. Artamonova¹,
artam@igm.nsc.ru

Aleksandr N. Shein^{2,3,4},
SheinAN@ipgg.sbras.ru

Vladimir V. Potapov^{2,4},
PotapovVV@ipgg.sbras.ru

Nikolay O. Kozhevnikov²,
KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Polina N. Novikova⁵,
polinagfz@gmail.com

Vladislav E. Ushnitskii⁶,
ushnitski@mail.ru

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Akademician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

² Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
3, Akademician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

³ Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District,
20, Respubliki street, Salekhard, 629008, Russia.

⁴ Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya street, Chita, 672039, Russia.

⁵ Mining Institute UB RAS,
78a, Sibirskaya street, Perm, 614007, Russia.

⁶ Ministry of Ecology, Nature management and Forestry of the RS (Ya),
31/1, Dzerzhinsky street, Yakutsk, 677000, Russia.

The relevance of the study is caused by the necessity to assess the current radiation and geo-ecological situation at the sites of peaceful underground nuclear explosions. In addition, this study will allow us to predict possible scenarios for development at such items located near settlements. The circumstantial research of the structure of the geotechnogenic system «center of an underground nuclear explosion – the host geological environment – the surface of the Earth» involves magnetic study. The land magnetic survey allow us to separate geoelectric anomalies caused by buried iron objects from other items that have a different nature.

The aim of the research is to detect and localize the buried iron objects on the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» based on the data of land magnetic survey.

Object. The area of the emplacement hole of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» was chosen for study. The capacity of the peaceful underground nuclear explosions «Crystal» was of 1,7 kt in TNT equivalent. It was made on October 2, 1974 at a depth of 98 m in frozen rocks at a distance of 6,7 km away from Udachny town (Western Yakutia). The debri mound (or sarcophagus) was built on the mouth of the emplacement hole in two steps – in 1992 and 2007. The diameter of the mound is 260 m, its maximal height is 20 m.

Methods. The magnetic survey was carried out on the profiles with a proton magnetometer MMPOS-1 with a reference frequency of 3 s. Georeferencing of points was performed using the Garmin 64st GPS receiver. Variations of the Earth's natural magnetic field were registered by a GSM-19 quantum magnetometer with a frequency of 10 s in a forest area near «Crystal» sarcophagus. Software complexes of statistical and spectral-correlation analysis of geophysical data «KOSKAD 3D» (author A.A. Nikitin, A.V. Petrov, A.S. Aleksashin) and of numerical modelling PRIZMA (author A.S. Dolgal) are used for the data analysis.

Results. 5323 readings of magnetic field on the area 430×330 m around the emplacement hole of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» were taken and systemized. The anomalous magnetic field ΔT_a of the site of the peaceful underground nuclear explosion «Crystal» was mapped based on these data. The local magnetic anomalies formed by buried iron objects were revealed. The widest and most intense anomaly with a diameter of 46 m and an amplitude of up to 8000 nT is located above the emplacement hole at the center of the sarcophagus. The sequential energy filtering of measured magnetic data allowed separating this magnetic anomaly into parts associated with different fragments of the emplacement hole casing. The results of modeling magnetic anomalies caused by the hole casing fragments are consistent with the measured magnetic data. So, the additive character of the magnetic anomaly is revealed. The other magnetic anomalies are presumably caused by casing pipes of research and technical wells that existed before the explosion at the site and were randomly removed by the explosion.

Key words:

Land geomagnetic survey, geoecological research, peaceful underground nuclear explosion, Yakutia.

The research was supported by the RFBR grants no. 18-45-140020, 19-05-00654A by the State tasks of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS and Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, by the State Order no. Ф.2019.473808 within the program «Assurance of ecological safety, efficient use of natural resources and forestry development of Republic of Sakha (Yakutia) for 2018–2022».

REFERENCES

1. *Mirnye yadernye vzryvy: obespechenie obshchey i radiatsionnoy bezopasnosti pri ikh provedenii* [Peaceful nuclear explosion: common and radiation safety arrangements]. Chief V.A. Logachev. Moscow, Izdat Publ., 2001. 512 p.
2. *Poiskovaya internet-platforma baz dannykh publikatsiy v nauchnykh zhurnalakh i patentov* [The publisher-independent global citation database]. Available at: <http://apps.webofknowledge.com> (accessed 05 March 2020).
3. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu., Artamonova S.Yu., Plotnikov A.E. The geoelectric structure at the site of «Crystal» underground nuclear explosion (Western Yakutia) from TEM data. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, Iss. 2, pp. 185–193.
4. Artamonova S.Yu., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Permafrost and ground water settings at the site of «Kraton-3» peaceful underground nuclear explosion (Yakutia), from TEM data. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, Iss. 5, pp. 555–565.
5. Ehmann S., Virgil C., Hördt A., Leven M. Directional location of buried objects using three-component magnetic borehole data demonstrated for the case of a drill string. *Geophysical Journal International*, 2016, vol. 205, Iss. 3, pp. 1916–1925.
6. Ayad A., Bakkali S. Analysis of the magnetic anomalies of buried archaeological ovens of Am Kerouach (Morocco). *International Journal of Geophysics*, 2018, vol. 2018, ID 9741950.
7. Teegen W.-R., Cordie R., Over Ph., Magdefessel S., Retzlaff R., Stoffels J. Archaeological prospections in the Roman vicus Belgium (Rhineland-Palatinate, Germany). *E&Q Quaternary Science Journal*, 2019, vol. 68, Iss. 1, pp. 5–11.
8. Wang Z., Chen B., Yuan J., Yang F., Jia L., Wang C. Localized geomagnetic field anomalies in an underground gas storage. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 2018, vol. 283, pp. 92–97.
9. Beggan C.D., Billingham L., Clarke E. Estimating external magnetic field differences at high geomagnetic latitudes from a single station. *Geophysical prospecting*, 2018, vol. 66, Iss. 6, pp. 1227–1240.
10. Novikova P.N. Application of detailed magnetics in intensive industrial noise conditions. *Practical and theoretical aspects of geological interpretation of gravitational, magnetic and electric fields. Springer Proceedings in the Earth and Environmental Sciences*, 2019, pp. 371–376.
11. Gedeonov A.D., Petrov E.R., Alexeev V.G., Kuleshova I.N., Savopulo M.L., Burtsev I.S., Shkroev V.Yu., Arkhipov V.I. Residual radioactive contamination at the peaceful underground nuclear explosion sites «Kraton-3» and «Crystal» in the Republic of Sakha (Yakutia). *J. Environ. Radioact.*, 2002, no. 60, pp. 221–234.
12. Ramzaev V., Mishine A., Golikov V., Argunova T., Ushnitski V., Zhuravskaya A., Sobakin P., Brown J., Strand P. Radioecological studies at the Kraton-3 underground nuclear explosion site in 1978–2007: a review. *J. Environ. Radioact.*, 2009, vol. 100, Iss. 12, pp. 1092–1099.
13. Sobakin P.I., Ushnitski V.E., Perk A.A. Radioecological situation in the region of Gorizont-4 underground nuclear explosion in Sakha Republic (Yakutia). *Radiochemistry*, 2019, vol. 61, Iss. 3, pp. 365–372.
14. Golubov B.N. Posledstviya tekhnogennoy destabilizatsii nedr As-trakhanskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya v zone podzemnykh yadernykh vzryvov [Consequences of technogenic destabilization of the Astrakhan gas condensate field in the zone of underground nuclear explosions]. *Geokologiya*, 1994, Iss. 4, pp. 25–42.
15. Stogniy V.V., Vasiliev S.P., Nevolskikh S.G. Izmeneniya geofizicheskikh poley pri podzemnykh yadernykh vzryvakh v Zapadnoy Yakutii [Changes in geophysical fields after underground nuclear explosions in Western Yakutia]. *Geofizicheskie issledovaniya v Yakutii* [Geophysical research in Yakutia]. Yakutsk, YaGU Publ., 1998, pp. 153–165.
16. Mikulenko K.I., Chomchoev A.I., Gotovtsev S.P. *Geologo-geograficheskie usloviya provedeniya i posledstviya podzemnykh yadernykh vzryvov na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Geological and geographical conditions and consequences of underground nuclear explosions on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Yakutsk, YaNC SO RAN Publ., 2006. 196 p.
17. Burtsev I.S., Kolodeznikova E.N. *Radiatsionnaya obstanovka v almazonosnykh rayonakh Yakutii (preprint)* [Radiation situation in the diamond-bearing regions of Yakutia (preprint)]. Yakutsk, YaNC SO RAN Publ., 1997. 52 p.
18. Artamonova S.Yu., Bondareva L.G., Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O. Geoeological model of «Crystal» peaceful underground nuclear explosion area (Yakutia). *Environmental Geoscience*, 2012, Iss. 2, pp. 143–158. In Rus.
19. *Coscad3D.ru*. Available at: www.coscad3d.ru (accessed 05 March 2020).
20. Dolgal A.S. Effect of Earth sphericity on the results of aeromagnetic measurements over platobasalts (on the example of Norilsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering*, 2019, vol. 33, no. 11, pp. 26–33. In Rus.
21. *Magnitorazvedka: spravochnik geofizika* [Magnetic survey: manual for geophysicists]. Eds. B.E. Nikitsky, Yu.S. Glebovsky. Moscow, Nedra Publ., 1990. 470 p.
22. Adushkin V.V., Spivak A.A. *Podzemnye vzryvy* [Underground explosions]. Moscow, Nauka Publ., 2007. 579 p.
23. *Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh no. 2020621125* [The certificate on the state registration of a database No. 2020621125]. Moscow, Rospatent, July 2 2020. Available at: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=DB&DocNumber=2020621125&TypeFile=html (accessed 25 October 2020).

Received: 18 November 2020.

Information about the authors

Svetlana Yu. Artamonova, Dr. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Aleksandr N. Shein, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; leading researcher, Arctic Research Center of the Yamal-Nenets Autonomous District; associate professor, Transbaikal State University.

Vladimir V. Potapov, Cand. Sc., senior researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; associate professor, Transbaikal State University.

Nikolay O. Kozhevnikov, Dr. Sc., main research scientist, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

Polina N. Novikova, Cand. Sc., researcher, Mining Institute UB RAS.

Vladislav E. Ushnitski, chief specialist, Ministry of Ecology, Nature management and Forestry of the RS (Ya).

УДК 666.189.3

АНАЛИЗ ВСПЕНИВАЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ СИНТЕЗЕ ПЕНОСТЕКЛА

Гольцман Борис Михайлович,
boriuspost@gmail.com

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

Актуальность исследования обусловлена решающим влиянием различных порообразующих веществ на формирование качественных и количественных характеристик пористой структуры пеностекла.

Цель: исследование вспенивающей активности различных типов порообразователей при синтезе пеностекла и изучение физико-химических процессов, происходящих при термической обработке шихт с использованием данных видов порообразователей.

Объекты: образцы пеностекла, где основным сырьем выбран бой бесцветного тарного стекла марки БТ-1, а актуальными порообразующими веществами – кальцит (мел), углерод (антрацит), глицерин.

Методы: синтез по порошковой технологии, обжиг в температурном интервале 800–900 °С с выдержкой 20 минут.

Результаты. Выделены основные типы порообразующих веществ – углеродные (углерод в различных формах, органические соединения) и карбонатные (карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов). Проведен синтез образцов пеностекла на основе выбранных порообразователей. Показано, что и антрацит, и мел в грубозернистой форме позволяют получить пористую структуру с плотностью ниже 300 кг/м³. Повышение температуры и количества порообразователя ведет для обоих составов к снижению плотности за счет уменьшения вязкости стекломассы и увеличения давления газов в порах. Структура образцов обоих составов обладает неравномерностью, что указывает на влияние размера частиц порообразователя на пористость. Объяснены различия в цвете образцов на основе различных порообразователей, связанные с различиями в физико-химических процессах взаимодействия порообразователя со стекломассой. При термической обработке образцов с использованием глицерина пористая структура отсутствует полностью, а плотность образцов превышает 1400 кг/м³, что соответствует плотно спеченному материалу и объясняется слишком быстрым его выгоранием до того, как шихта превратилась в плотный спек, способный удерживать порообразующие газы.

Ключевые слова:

Пеностекло, вспенивание, порообразователь, углерод, кальцит, глицерин.

Введение

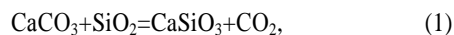
Вспенивание пеностекла – это сложный комплекс физико-химических процессов разложения порообразователя и взаимодействия порообразователя и продуктов его разложения со стекломассой.

Вспенивание пеностекла включает процессы, единые для всех гетерогенных пиропластичных материалов. Они основаны на процессах капсулирования вспенивающих соединений, формировании микропор и дальнейшем их росте. Это связано с химией реакций газообразования, изменением вязкости и поверхностного натяжения жидкой фазы, фазовыми переходами, а также ростом давления заключенных в ячейках газов.

Выделение газов при получении пеностекла обусловлено окислением, испарением и диссоциацией порообразователя. Кроме того, во время нагревания шихты протекают химические реакции между порообразователем и стекломассой. Выделение газа внутри вязкой стекломассы и формирование пористой структуры зависят от реакционной способности порообразователя. При этом и вид порообразователя, и конкретное вещество оказывают ключевое воздействие на тип пористости (закрытая, открытая) и ее количественные характеристики (размер пор) [1–3].

Все порообразователи для синтеза пеностекла, за исключением вспенивания геополимерных пористых материалов [4–7], традиционно делятся на две группы. В группе *нейтрализационных порообразователей*

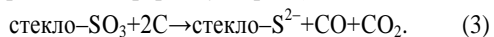
вспенивающие газы формируются в результате реакции нейтрализации. Такие стеклообразующие оксиды, как SiO₂, B₂O₃ и P₂O₅, в реакции нейтрализации являются кислым реагентом, а порообразователь (чаще всего карбонат щелочного или щелочноземельного металла) – основным реагентом [8–11]. Процесс выделения газов при использовании кальцита можно выразить реакцией (1). В то же время начинается процесс разложения, интенсивность которого зависит как от температуры, так и от давления газов в порах известняка, по реакции (2). Кроме карбонатов кальция в качестве порообразователя могут выступать карбонаты других элементов: магния (магнезит, доломит), натрия (сода), калия (поташ) и т. д.



Оксиды металлов, формирующиеся при разложении карбонатов, встраиваются в стеклянную массу и выступают как оксиды-модификаторы, тем самым изменяя вязкость расплава стекла. Выделяющийся газ CO₂ задерживается в массе вязкого стекла, и его давление постепенно увеличивается, заставляя стекломассу расширяться. При последующем охлаждении расплавленная стекломасса затвердевает, и образуется пористая структура.

При использовании веществ из группы *окислительно-восстановительных порообразователей* вспенивание происходит за счет восстановления некоторого

компонента стекла компонентом порообразователя, вследствие чего происходит выделение газов [3, 11–16]. Окислительно-восстановительную реакцию, ведущую к газообразованию, можно представить схемой (3). В качестве углеродных порообразователей может применяться широкий диапазон веществ, отличающихся по фазовому составу (жидкости, твердые тела) и происхождению (органические соединения, карбид кремния, различные формы углерода).

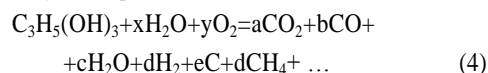


Из реакции следует, что выделение газов при применении углеродистых порообразователей осуществляется при взаимодействии не со всей стекломассой, а лишь с ее отдельными компонентами. В данной реакции окислителем является оксид серы (VI), содержащийся в некотором количестве во всех технических силикатных стеклах. Оксид серы присутствует даже в стеклах, синтезированных из бессульфатных шихт, вследствие сульфатных примесей в природных солях натрия, а также из-за контакта с топочными газами, содержащими соединения серы. В процессе реакции сульфатная сера стекла S^{6+} восстанавливается до сульфид-ионов S^{2-} , что подтверждается наличием сероводорода внутри пор пеностекла.

Ключевым требованием к твердым формам порообразователей обоих видов является их ультратонкий (более $7000 \text{ см}^2/\text{г}$) помол. Энергоемкость данной стадии сопоставима с энергоемкостью термической обработки и существенно удорожает производство. Вследствие этого весьма перспективной стратегией для формирования пористой структуры с однородным распределением пор по размерам является использование органического порообразователя, равномерно диспергированного в форме раствора. Фактически порообразователь образуется за счет его пиролизного разложения и дальнейшего окисления остатков пиролиза. Пленка порообразователя на частицах стекла при пиролизе превращается в нанослой углерода и таким образом приводит к однородному распределению пор [17]. Вследствие этого на двух крупнейших российских предприятиях по производству пеностекла – «ICM Glass Kaluga» и Компания «СТЭС-Владимир» – в качестве порообразователя применяется глицерин [18–21].

При использовании глицеринового порообразователя процесс вспенивания дополнительно осложняется процессами термического разложения глицерина, которое протекает по двум основным механизмам: пиролиз и риформинг (паровая конверсия). Пиролиз в данном случае – это термическое разложение органических соединений при недостатке кислорода. Условия недостатка кислорода наблюдаются внутри спрессованного полуфабриката. При пиролизе глицерина возможно получение широкого ряда продуктов: сажа, этанол, ацетон, вода, CO , CO_2 , H_2 и т. д. [22]. Однако при температуре выше 800°C разложение глицерина практически завершается и в пиролизате присутствуют в основном CO , H_2 , CO_2 , CH_4 и C_2H_4 [23]. Риформинг – это процесс превращения глицерина в монооксид углерода, водород и углеводороды, происхо-

дящий в присутствии воды или водяных паров в атмосфере воздуха по реакции (4) [24]:



Применение как карбонатных (мел, известняк), так и углеродных неорганических (антрацит, сажа) и органических (глицерин, сахара) порообразователей довольно распространено. Однако обоснованию их вида, количества и гранулометрического состава практически не уделяется внимания. Вследствие этого целью данной работы было исследование вспенивающей активности различных типов порообразователей при вспенивании модельных составов пеностекла на основе чистого бесцветного (белого) стекла. При этом в качестве порообразователей были использованы вещества в грубозернистой форме, а также чистый глицерин.

Материалы и методы

Для исследования были выбраны следующие материалы: кальцит CaCO_3 , углерод в форме антрацита, глицерин. В качестве основного сырьевого материала для получения пеностекла использовался бой белого тарного стекла марки БТ-1, мас. %: SiO_2 – 71,9; Al_2O_3 – 2,4; Na_2O – 14,3; K_2O – 0,1; Fe_2O_3 – 0,1; CaO – 9,0; MgO – 2,0; TiO_2 – 0,2.

Процесс получения пеностекла по порошковой технологии включает следующие стадии: приготовление шихты, вспенивание, отжиг, механическая обработка. Предварительно производился отдельный помол сырьевых компонентов в шаровой мельнице объемом 5 л до достижения размера частиц менее 250 мкм (проход через сито № 025). Шихта изготавливалась путем тщательного перемешивания всех компонентов в точно указанных пропорциях до однородной массы. Приготовленная шихта загружалась в ручной пресс для формовки образцов в виде кубов с длиной грани 20 мм. Перед загрузкой в печь на поверхность металлической формы, в которой производилось вспенивание, наносился каолиновый порошок для предотвращения прилипания стекла к металлу. Затем приготовленные образцы подвергались термической обработке, согласно температурно-временному режиму, показанному на рис. 1 [20]. На графике режим соответствует вспениванию при температуре 850°C .

Следует отметить, что показанные на графике параметры можно регулировать в зависимости от используемого типа боя стекла, порообразующего вещества, габаритных размеров формы для вспенивания и т. д. В печи форма с образцами помещалась в середину печи, в зону постоянных температур. Затем печь плотно закрывалась и осуществлялась термическая обработка согласно рис. 1. После стадии нагрева (по достижении заданной температуры вспенивания) форму выдерживали при этой температуре в течение 20 минут. Далее печь выключали, открывали и проводили резкое охлаждение в течение 3 минут для закрепления структуры материала. Поскольку при этом поверхностные слои материала могут переохладаться, далее проводилась стадия медленного охлаждения

(стабилизации) при температуре 600 °С. Образцы отжигались в течение не менее 4–5 часов при самопроизвольном охлаждении печи.

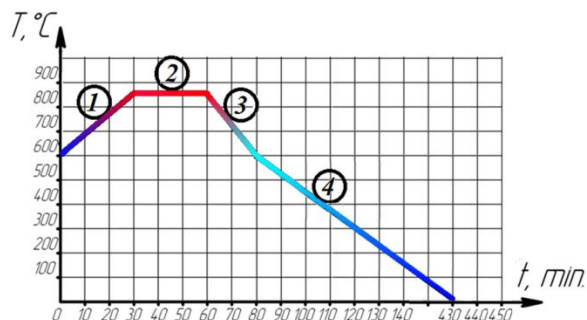


Рис. 1. График термической обработки образцов пеностекла: 1 – нагрев; 2 – выдержка (вспенивание); 3 – стабилизация структуры (резкое охлаждение); 4 – отжиг (медленное охлаждение)

Fig. 1. Graph of foam glass samples heat treatment: 1 – heating; 2 – exposure (foaming); 3 – structure stabilization (sharp cooling); 4 – annealing (slow cooling)

После удаления остывших образцов пеностекла из форм для придания им правильной формы проводилась их механическая обработка, после чего осуществлялся их визуальный осмотр, во время которого делались выводы о размере пор, их распределении и однородности структуры. Затем определялась масса и объем образцов и рассчитывалась их плотность d (кг/м³) по формуле (5).

$$d = \frac{m}{abc} \cdot 1000, \quad (5)$$

где m – масса образца, г; a – длина образца, см, b – ширина образца, см, c – высота образца, см.

Результаты и обсуждение

Для определения интенсивности вспенивания образцов пеностекла с применением различных порообразователей был разработан ряд составов, представленный в таблице. Было произведено вспенивание образцов разработанных составов при температурах вспенивания 800, 850, 900 °С. Внутренняя структура представлена на рис. 2–4, а плотность образцов – в таблице.

Таблица. Плотность синтезированных образцов

Table. Density of the synthesized samples

Вид и количество порообразователя, мас. % Type and amount of foaming agent, wt. %	Плотность, кг/м ³ , при температуре вспенивания, °С Density, kg/m ³ , at foaming temperature, °С		
	800	850	900
Мел/Chalk, 1	1095	686	665
Мел/Chalk, 3	548	466	351
Мел/Chalk, 5	293	281	340
Антрацит/Anthracite, 1	1941	1784	1549
Антрацит/Anthracite, 3	1612	999	899
Антрацит/Anthracite, 5	490	275	223
Глицерин/Glycerol, 1	1705	1930	1908
Глицерин/Glycerol, 3	1561	1671	1663
Глицерин/Glycerol, 5	1445	1527	1499

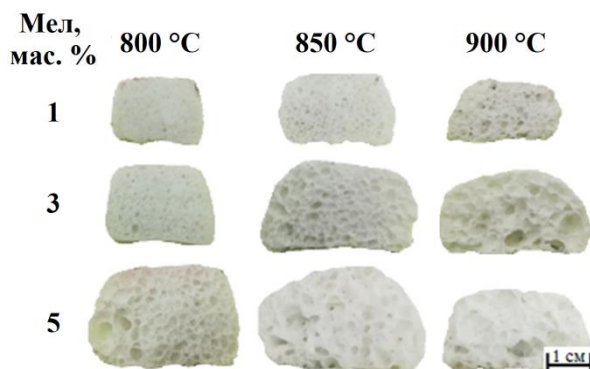


Рис. 2. Внутренняя структура образцов на основе кальцита (мела)

Fig. 2. Internal structure of the samples based on calcite (chalk)

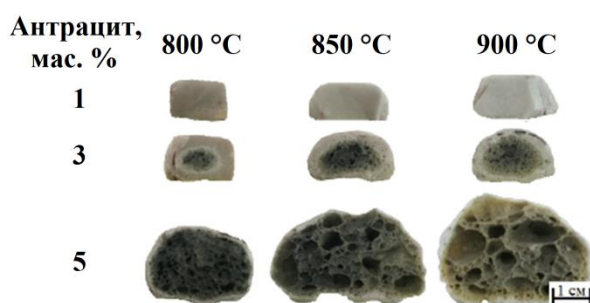


Рис. 3. Внутренняя структура образцов на основе углерода (антрацита)

Fig. 3. Internal structure of the samples based on carbon (anthracite)

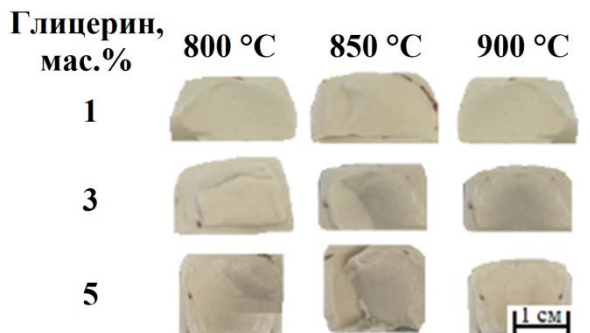


Рис. 4. Внутренняя структура образцов на основе глицерина

Fig. 4. Internal structure of the samples based on glycerol

Из полученных результатов видно, что и углерод (антрацит), и кальцит (мел) в грубозернистой форме позволяют получить пористую структуру с плотностью ниже 300 кг/м³. Повышение температуры ведет для обоих составов к снижению плотности за счет уменьшения вязкости стекломассы и увеличения давления газов в порах. Структура образцов обоих составов обладает неравномерностью, что обусловлено влиянием размера частиц порообразователя на пористость: чем он меньше, тем меньше поры и равномернее получаемая структура. Это подтверждает необходимость ультратонкого помола порообразователя, что является фактором, усложняющим производство пеностекла.

Различия в цвете образцов на основе различных порообразователей объясняются физико-химическими процессами, происходящими при их разложении, т. е. в качестве исходного сырья было выбрано бесцветное (белое) стекло. Так, при разложении мела образуются CaO и CO_2 , не оказывающие влияния на окраску стекла, вследствие чего цвет вспененных образцов соответствует цвету исходного стекла как во внешних, так и во внутренних частях материала. При увеличении количества мела вспенивание закономерно интенсифицируется, а плотность уменьшается с 685 до 281 кг/м^3 (для температуры 850 °С). Пористая структура при использовании мела в грубозернистой форме принадлежит к открытому типу, т. е. поры соединяются друг с другом, образуя сообщающиеся каналы, причем размер и распределение пор отличается крайней нестабильностью.

Процесс формирования открытой пористости может быть объяснен тем фактом, что мел, являясь плавнем второго рода, снижает вязкость стекломассы и облегчает прорыв межпоровых перегородок, за счет чего и формируется открытая пористость. Здесь также важно отметить, что у состава «мел, 5 мас. %» наблюдается процесс повышения плотности образцов с повышением температуры сверх 850 °С. Это также связано с флюсующим воздействием CaCO_3 на стекло. За счет этого стекломасса быстрее проходит интервал формовочной вязкости (10^6 – 10^4 Па·с), после которого начинается оседание пены под собственным весом, а также коалесценция (слияние) пор. Совокупность этих процессов ведет к удалению газов из внутренней части материала и последующему повышению плотности.

Образцы на основе углерода характеризуются белым цветом снаружи и темным внутри материала. Также можно заметить градиент изменения окраски по толщине материала. Это следует объяснить тем, что при термической обработке углерод во внешних слоях образца более плотно контактирует с кислородом воздуха, что способствует его полному выгоранию, которое может быть схематично описано реакцией (6).



Во внутренних слоях вследствие дефицита кислорода углерод выгорает не полностью, а образующаяся нанодисперсная сажа оседает на стенках пор и окрашивает материал. Такая сажа, помимо придания окраски, играет роль поверхностно-активного вещества, повышающего стабильность стекольной пены. Вследствие этого образцы с использованием углерода обладают пористостью закрытого типа, т. е. поры не соединены между собой. С повышением содержания

антрацита и интенсивность вспенивания, и размер окрашенной области возрастают. Плотность образцов уменьшается с 1785 до 275 кг/м^3 (для температуры 850 °С) и 223 кг/м^3 (для температуры 900 °С). Однако за счет грубодисперсного состояния порообразователя поры крайне неоднородны по размеру, что будет негативно сказываться на стабильности свойств получаемых материалов.

Интересным является тот факт, что при термической обработке образцов с использованием жидкофазного углеродного порообразователя (глицерина) пористая структура отсутствует полностью, а плотность образцов превышает 1400 кг/м^3 , что соответствует плотно спеченному материалу. Это можно объяснить тем фактом, что глицерин как органическое соединение высоко горюч (температура самовоспламенения 393 °С), вследствие чего он успевает практически полностью выгореть до того момента, когда шихта превратилась в плотный спек, способный удерживать порообразующие газы. С повышением количества глицерина цвет образца становится более серым, что указывает на следы продуктов пиролиза. Подобные результаты тем более любопытны, поскольку на крупных предприятиях глицерин активно используется в качестве порообразователя. Следовательно, в чистом виде глицерин использовать невозможно, вследствие чего необходимо подробнее исследовать способы капсуляции либо самого глицерина, либо продуктов его термического разложения до температур, соответствующих вязкости вспенивания.

Заключение

Таким образом, при использовании в качестве порообразователя карбонатных (кальцит) и углеродных неорганических (антрацит) веществ в грубозернистой (размер частиц менее 250 мкм) форме можно получить пеностекло с плотностью менее 300 кг/м^3 . Лимитирующим фактором, влияющим на качественные и количественные параметры пористой структуры, является размер частиц порообразователя. При использовании в качестве порообразователя органических углеродных порообразователей (глицерина) формирования пористой структуры не происходит из-за преждевременного выгорания, что ведет к необходимости введения добавок, устраняющих этот процесс.

Работа выполнена в ЮРГПУ (НПИ) при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 19-79-00015 «Исследование общих закономерностей синтеза пористых материалов на основе техногенного и природного силикатного сырья» (руководитель – Б.М. Гольцман).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демидович Б.К. Пеностекло. – Минск: Наука и техника, 1975. – 248 с.
2. Демидович Б.К. Производство и применение пеностекла. – Минск: Наука и техника, 1972. – 301 с.
3. Шилл Ф. Пеностекло. – М.: Стройиздат, 1965. – 327 с.
4. Смирнов П.В., Иванов К.С., Константинов А.О. Литология пород туртаской свиты и возможности их использования в качестве сырья для производства пеностеклокерамики на примере успенской площади (Тюменская область) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 7. – С. 112–120.
5. Разработка способа утилизации отходов горнообогатительных комбинатов созданием активных фильтрующих обезжелезивающих материалов / Н.В. Вадулина, Н.Х. Абдрахманов, А.В. Федосов, И.И. Бадурдинова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 11. – С. 37–43.

6. Water and waterglass mixtures for foam glass production / D. Hesky, C.G. Aneziris, U. Groß, A. Horn // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 12604–12613.
7. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix / R. Silva, E. Kubaski, E. Tenório-Neto, M. Lima-Tenório, S. Tebcherani // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2019. – V. 511. – P. 177–182.
8. Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // *Ceramics International*. – 2009. – V. 35. – P. 229–235.
9. Petersen R.R., König J., Yue Y. The viscosity window of the silicate glass foam production // *Journal of Non-Crystalline Solids*. – 2017. – V. 456. – P. 49–54.
10. König J., Petersen R.R., Yue Y. Influence of the glass–calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass // *Journal of the European Ceramic Society*. – 2014. – V. 34. – P. 1591–1598.
11. Гольцман Б.М. Влияние порообразователя на свойства пеношлакостекла // *Научное обозрение*. – 2015. – № 21. – С. 102–105.
12. Оценка конкурентоспособности стеновых строительных материалов со стекловидными защитно-декоративными покрытиями, полученными методом плазменного оплавления / В.С. Бессмертный, Н.И. Минько, Н.И. Бондаренко, А.В. Симачев, Н.М. Здоренко, И.В. Роздольская, Д.О. Бондаренко // *Стекло и керамика*. – 2015. – № 2. – С. 3–8.
13. Kazmina O.V., Tokareva A.Y., Vereshchagin V.I. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material // *Resource-Efficient Technologies*. – 2016. – V. 2. – P. 23–29.
14. Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов П.А. Научные и технологические аспекты производства пеностекла // *Физика и химия стекла*. – 2015. – Т. 41. – № 2. – С. 214–221.
15. Lee C. Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2013. – V. 19. – P. 1916–1925.
16. König J., Petersen R.R., Yue Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass // *Ceramics International*. – 2015. – V. 41. – P. 9793–9800.
17. Разработка составов и технологических параметров синтеза ячеистых теплоизоляционных строительных стекломатериалов с заданной плотностью / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, А.С. Косарев, Б.М. Гольцман // *Стекло и керамика*. – 2016. – № 6. – С. 22–25.
18. Способ получения пеностекла: пат. Рос. Федерация, № 2701951, заявл. 09.07.2019; опубл. 03.10.2019, Бюл. № 28. – 11 с.
19. Влияние гранулометрического состава шихты на технологические и физико-химические свойства гранулированного пористого силикатного заполнителя / В.А. Смолий, Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев // *Стекло и керамика*. – 2017. – № 8. – С. 12–14.
20. Синтез пеностекла с использованием шлаков и глицериновой порообразующей смеси / Е.А. Яценко, Б.М. Гольцман, А.С. Косарев, Н.С. Карандашова, В.А. Смолий, Л.А. Яценко // *Физика и химия стекла*. – 2018. – Т. 44. – № 2. – С. 199–205.
21. Фракционный утеплитель из вспененного стекла для железнодорожного строительства: пат. Рос. Федерация, № 2681157, заявл. 28.08.2017; опубл. 01.03.2019, Бюл. № 7. – 7 с.
22. The photocatalytic conversion of (biodiesel derived) glycerol to hydrogen – a short review and preliminary experimental results. P. 1: a review / M. Stelmachowski, M. Marchwicka, E. Grabowska, M. Diak, A. Zaleska // *Journal of Advanced Oxidation Technologies*. – 2014. – V. 17 (2). – P. 167–178.
23. Valliyappan T., Bakshi N.N., Dalai A.K. Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99 (10). – P. 4476–4483.
24. Experimental investigation of hydrogen production from glycerin reforming / A.M. Douette, S.Q. Turn, W. Wang, V.I. Keffer // *Energy & Fuels*. – 2007. – V. 21 (6). – P. 3499–3504.

Поступила 25.11.2020 г.

Информация об авторах

Гольцман Б.М., кандидат технических наук, доцент кафедры общей химии и технологии силикатов Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова.

UDC 666.189.3

ANALYSIS OF FOAMING ACTIVITY OF DIFFERENT TYPES OF FOAMING AGENTS IN FOAM GLASS SYNTHESIS

Boris M. Goltsman,
boriuspost@gmail.com

Platov South Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya street, Novocherkassk, 346428, Russia.

The relevance of the research is explained by the decisive influence of various foaming agents on formation of qualitative and quantitative characteristics of the porous structure of foam glass.

The main aim of the research is to study the foaming activity of various types of foaming agents in the synthesis of foam glass and to identify the physical-chemical processes that occur during the heat treatment of the mixture using these types of foaming agents.

Objects: foam glass samples, where the main raw material was the cullet of colorless container glass of the BT-1 brand, and the relevant foaming agents were: calcite (chalk), carbon (anthracite), glycerol.

Methods: the synthesis using powder technology; firing in the temperature range of 800–900 °C with an exposure time of 20 minutes.

Results. The most relevant foaming agents: carbon (carbon in various forms, organic compounds) and carbonate (carbonates of alkali and alkaline earth metal) were identified. The synthesis of foam glass samples based on the selected foaming agents was carried out. Both anthracite and chalk in coarse-grained form make it possible to obtain a porous structure with a density below 300 kg/m³. An increase in temperature and the amount of foaming agent leads to decrease in density for both compositions by reducing the viscosity of the glass melt and increasing the pressure of the gases in the pores. The structure of the samples of both compositions is uneven, which indicates the influence of the foaming agent particle size on the porosity. The differences in the color of the samples based on various foaming agents were explained. They are associated with differences in the physicochemical processes of interaction of the foaming agent with the molten glass. In the heat treatment of samples using glycerol, the porous structure is completely absent, and the density of the samples exceeds 1400 kg/m³, which corresponds to densely sintered material, which is explained by its fast burnout before the batch turns into a dense sinter capable of holding foaming gases.

Key words:

Foam glass, foaming, foaming agent, carbon, calcite, glycerol.

The work was performed in SRSPU (NPI) with the financial support of the Russian Science Foundation, agreement no. 19-79-00015 «Investigation of general laws of the synthesis of porous materials based on technogenic and natural silicate raw materials» (head – B.M. Goltsman).

REFERENCES

- Demidovich B.K. *Penosteklo* [Foam glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1975. 248 p.
- Demidovich B.K. *Proizvodstvo i primeneniye penostekla* [Production and use of foam glass]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1972. 301 p.
- Schill F. *Penosteklo* [Foam glass]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1965. 327 p.
- Smirnov P.V., Ivanov K.S., Konstantinov A.O. Lithology of tuffaceous rocks and opportunities of their use as a raw material for foam glass ceramics on the example of uspenskiy area (Tyumen region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 7, pp. 112–120. In Rus.
- Vadulina, N.V., Abdrakhmanov, N.Kh., Fedosov, A.V., Badrtidnova, I.I. Development of a method for utilization of waste from mining and processing plants by creating active filtering deionizing materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 11, pp. 37–43. In Rus.
- Hesky D., Aneziris C.G., Groß U., Horn A. Water and waterglass mixtures for foam glass production. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 12604–12613.
- Silva R., Kubaski E., Tenório-Neto E., Lima-Tenório M., Tebcherani S. Foam glass using sodium hydroxide as foaming agent: Study on the reaction mechanism in soda-lime glass matrix. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, vol. 511, pp. 177–182.
- Fernandes H.R., Tulyaganov D.U., Ferreira J.M. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, 2009, vol. 35, pp. 229–235.
- Petersen R.R., König J., Yuanzheng Y. The viscosity window of the silicate glass foam production. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2017, vol. 456, pp. 49–54.
- König J., Petersen R.R., Yue Y. Influence of the glass–calcium carbonate mixture's characteristics on the foaming process and the properties of the foam glass. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34, pp. 1591–1598.
- Goltsman B.M. Vliyaniye poroobrazovatelya na svoystva penostekla [Foaming agent influence on the properties of foam glass]. *Nauchnoye obozreniye*, 2015, no. 21, pp. 102–105.
- Bessmertnyy V.S., Min'ko N.I., Bondarenko N.I., Simachev A.V., Zdorenko N.M., Rozdol'skaya I.V., Bondarenko D.O. Evaluation of the Competitiveness of Wall Building Materials with Glassy Protective-Decorative Coatings Obtained by Plasma Fusing. *Glass and Ceramics*, 2015, vol. 72, pp. 41–46.
- Kazmina O.V., Tokareva A.Y., Vereshchagin V.I. Using quartzofeldspathic waste to obtain foamed glass material. *Resource-Efficient Technologies*, 2016, vol. 2, pp. 23–29.
- Vaisman Ya.I., Ketov A.A., Ketov P.A. The scientific and technological aspects of foam glass production. *Glass Physics and Chemistry*, 2015, vol. 41, pp. 157–162.
- Lee C. Production of alumino-borosilicate foamed glass body from waste LCD glass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2013, vol. 19, pp. 1916–1925.
- König J., Petersen R.R., Yue Y. Fabrication of highly insulating foam glass made from CRT panel glass. *Ceramics International*, 2015, vol. 41, pp. 9793–9800.
- Smolii V.A., Yatsenko E.A., Kosarev A.S., Goltsman B.M. Development of compositions and technological parameters for the synthesis of cellular glass heat-insulation construction materials with prescribed density. *Glass and Ceramics*, 2016, vol. 73 (5–6), pp. 219–221.
- Lazarev E.V. *Sposob polucheniya penostekla* [A method of producing foam glass]. Patent RF, no. 2701951, 2019.
- Smolii V.A., Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S. Influence of granulometric composition of batch on technological and

- physical-chemical properties of granular porous silicate aggregate. *Glass and Ceramics*, 2017, vol. 74 (7–8), pp. 270–272.
20. Yatsenko E.A., Goltsman B.M., Kosarev A.S., Karandashova N.S., Smoliy V.A., Yatsenko L.A. Synthesis of foamed glass based on slag and a glycerol pore-forming mixture. *Glass Physics and Chemistry*, 2018, vol. 44, no. 2, pp. 152–155.
 21. Fefelov A.B., Nikulin M.L. *Fraktsionnyy uteplitel iz vspenennogo stekla dlya zheleznodorozhnogo stroitelstva* [Fractional insulation made of foamed glass for railway construction]. Patent RF, no. 2681157, 2019.
 22. Stelmachowski M., Marchwicka M., Grabowska E., Diak M., Zaleska A. The photocatalytic conversion of (biodiesel derived) glycerol to hydrogen – a short review and preliminary experimental results. Pto 1: a review. *Journal of Advanced Oxidation Technologies*, 2014, vol. 17 (2), pp. 167–178.
 23. Valliyappan T., Bakshi N.N., Dalai A.K. Pyrolysis of glycerol for the production of hydrogen or syn gas. *Bioresource Technology*, 2008, vol. 99 (10), pp. 4476–4483.
 24. Douette A.M., Turn S.Q., Wang W., Keffer V.I. Experimental investigation of hydrogen production from glycerin reforming. *Energy & Fuels*, 2007, vol. 21 (6), pp. 3499–3504.

Received: 25 November 2020.

Information about the authors

Boris M. Goltsman, Cand. Sc., associate professor, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI).

УДК 621.644

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ СИЛОВЫХ ИМПУЛЬСОВ ЧЕРЕЗ РЕЗЬБОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ ПРИ ВРАЩАТЕЛЬНО-УДАРНОМ БУРЕНИИ ПИЛОТНЫХ СКВАЖИН ДЛЯ БЕСТРАНШЕЙНОЙ ПРОКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДОВ

Саруев Лев Алексеевич¹,
saruevla@tpu.ru

Гончаров Николай Вячеславович²,
nv.goncharov@mail.ru

Мельнов Кирилл Вячеславович¹,
kvm11@tpu.ru

Саруев Алексей Львович¹,
saruev@tpu.ru

Шадрина Анастасия Викторовна¹,
kr_nas_sh@tpu.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность. Пилотные скважины при горизонтально-направленном бурении можно отнести к скважинам малого диаметра, которые находят широкое применение в горном деле, в частности, для детальной разведки и подземной разработки руд цветных металлов, для дегазации горных выработок угольных шахт, а также во многих других отраслях промышленности, где необходимо по технологическим или техническим условиям ограничивать диаметр скважины. Для эффективного бурения таких скважин в перемежаемых по твердости горных породах буровые установки оснащаются ударными механизмами, формирующими в бурильной колонне ударные (силовые) импульсы в виде волн упругой деформации, воздействующие через бурильную колонну на разрушаемую горную породу. При этом неизбежно рассеивание энергии импульсов в резьбовых соединениях. Если соединения бурильных труб предназначены только для вращательного бурения, то потери энергии силовых импульсов в них могут быть недопустимо большими, а работоспособность и прочность существенно снижены. Хотя резьбовые соединения принято считать неподвижными, в действительности при одновременном нагружении их крутящим моментом, усилием подачи на забой бурового инструмента и силовыми импульсами неизбежно возникают малые проскальзывания по контактным поверхностям элементов соединений бурильных труб. На этих относительных перемещениях совершают работу силы трения, вызывая энергетические потери, количественно оценить которые можно экспериментальным путем. Научное обоснование и разработка рекомендаций по проектированию и созданию новых конструкций резьбовых соединений бурильных колонн для повышения эффективности способа вращательно-ударного бурения скважин является актуальной научно-технической задачей.

Цель: выполнить анализ динамических процессов в резьбовых соединениях бурильной колонны при передаче силовых импульсов от ударного узла к породоразрушающему инструменту; построить гистерезисные диаграммы, позволяющие на основе выполненных экспериментов оценить энергетические потери, связанные с работой сил неупругого сопротивления в местах контакта сопряженных деталей резьбовых соединений во время распространения через них силовых импульсов; показать на примерах бесполезность попыток добиться эффективной передачи ударных импульсов через соединения труб, применяемых при вращательном способе бурения, и обосновать рекомендации по разработке принципиально новых ниппельных соединений труб, предлагаемых Национальным исследовательским Томским политехническим университетом для бурения пилотных скважин, ранее успешно прошедших производственные испытания на рудниках цветной металлургии в Кыргызстане и Казахстане с непосредственным участием авторов.

Объектом исследования являются бурильные колонны с муфтовыми и ниппельными соединениями, которые применяются при вращательно-ударном способе бурения скважин, а также резьбовые соединения труб для пилотных скважин горизонтально-направленного бурения.

Методика: обзор источников научной литературы по вопросам передачи ударных импульсов по бурильной колонне; обоснование возможности эффективного использования вращательно-ударного способа бурения для прокладки коммуникаций бестраншейным методом, а также определение величины потерь энергии в резьбовых соединениях труб на основе моделирования нагружения на лабораторном стенде.

Результаты. На основе экспериментальной работы и компьютерного моделирования установлены взаимосвязи параметров резьбовых соединений и эффективности передачи ударных импульсов по бурильной колонне; выявлено, что обеспечение минимально возможного значения жесткости соединительного элемента при наибольшей контактной жесткости сопряженных витков соединения приводит к повышению коэффициента передачи амплитуды силы и энергии импульсов. Применяемые в настоящее время соединения бурильных труб для горизонтально-направленного бурения скважин не пригодны для вращательно-ударного способа бурения из-за отражений волн деформации от участков резьбовых соединений бурильных труб без соединительных элементов (муфт или специальных ниппелей закрытого типа).

Ключевые слова:

Горизонтально-направленное бурение, технология вращательно-ударного бурения, передача силового импульса, пилотная скважина, колонна бурильных труб, резьбовое соединение.

Технология бурения, связанная с передачей осевого усилия подачи, крутящего момента и ударных нагрузок на забой скважины в виде формируемых волн деформации, эффективна при разрушении горных пород и нашла применение и в различных установках горизонтально-направленного бурения, реализующих бестраншейный метод прокладки подземных коммуникаций [1].

Эффективность применения рассматриваемого способа связана со сложными динамическими процессами в колоннах труб, изучением которых на протяжении десятилетий в середине XX в. занимались ученые из разных стран [2–6].

Особым элементом в цепи «буровая установка – колонна – породоразрушающий элемент – горная порода» являются резьбовые соединения, отличающиеся значительным конструктивным разнообразием решений. Широкое распространение получила резьба круглого профиля (рис. 1) [7].

В работах [8–20] представлен ряд важных положений касательно функционирования резьбового соединения в процессе его нагружения, в том числе вращательно-ударного, которые должны учитываться при проектировании соединений труб. Так, например, установлено, что сокращение длины резьбы в резьбовых соединениях у торцов труб до 1,2–1,4 ее внутреннего диаметра, а также наличие центрирующих участков позволяет увеличить устойчивость и долговечность буровых труб.

Распределение нагрузки по виткам резьбы определяется механизмом нагружения резьбовых элементов в соединении. В работе [3] автор приходит к выводу, что контакт между витками резьбы в соединении происходит по поверхности. В то же время влияние контактных деформаций несущественно, и ими можно пренебречь.

Соединение труб, представленное на рис. 1, имеет зазоры, при этом контакт происходит по линии, если представить соединение в сечении – в точке.

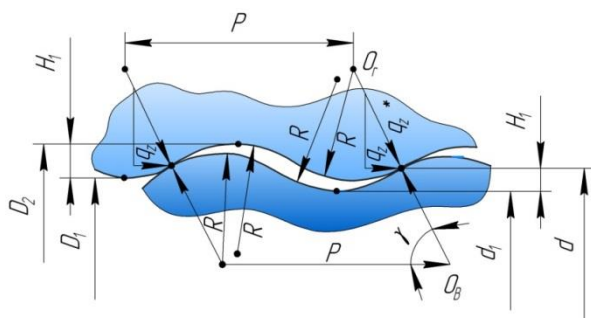


Рис. 1. Схема соединения буровых труб с круглой резьбой

Fig. 1. Connection diagram for round-threaded drill pipes

В работе [3] отмечается, что деформации изгиба и сдвига витков будут незначительными в силу малой высоты профиля резьбы относительно шага. Контактные деформации для всех размеров применяемых в настоящее время соединений с резьбой круглого профиля [3, 8] практически одинаковы.

Методика экспериментальных исследований потерь энергии в резьбовых соединениях буровых труб

В данной работе характер изменения сил упругого и неупругого сопротивления исследовался на испытательной установке при квазистатическом нагружении соединений буровых труб.

На рис. 2, а представлена структурная схема установки, а на рис. 2, б приведен процесс снятия гистерезисных диаграмм. Установка состоит из регулируемых опор – 1, нижней траверсы – 2, на которой закреплено захватывающее устройство – 3, где располагаются датчики силы, выше располагается верхняя траверса – 7. При движении траверсы – 7 через захват – 6 начинает действовать нагрузка в зависимости от направления движения на закрепленное резьбовое соединение – 5. Параметры буровых труб и соединительных элементов приведены на рис. 3, геометрические размеры указаны в работах [4, 7].

Испытательная машина серии LFM-125 кН преобразует деформацию резьбового соединения, возникающую в результате воздействия растяжения, сжатия, изгиба, в аналоговый электрический сигнал, соответствующий величине измеряемого параметра.

Методика снятия гистерезисных диаграмм включала ряд этапов:

- 1) подготовка резьбового соединения буровых труб – 5 к установке на испытательной машине; жесткая фиксация концов буровых труб в захватных устройствах – захватах – 3 и 6;
- 2) измерение датчиком силы, размещенным в захвате – 2, нагрузки, прикладываемой к образцу;
- 3) измерение перемещения траверсы датчиком перемещения;
- 4) перемещение подвижной траверсы осуществляется от отдельного привода (существует возможность изменения высоты рабочего пространства перемещения траверсы);
- 5) управления режимами работы испытательной машины осуществляется в блоке управления и сбора данных.

Форма и профиль резьбы приведены на рис. 3.

В качестве материала для изготовления буровых труб применяют хромоникелевые стали 40ХН, 45ХН, 50ХН. Сопряжение резьбового соединения буровых труб выполнено с зазором. Для защиты от коррозии внутренний канал фосфатируют [4].

Полученные в результате эксперимента гистерезисные диаграммы представлены на рис. 4. Находясь в условиях сложного динамического нагружения [5], резьбовые участки труб испытывают поперечную деформацию, направленную в ниппельном соединении от соединительного элемента, в муфтовых – к соединительному элементу.

Стоит также отметить еще один важный аспект относительно применения ниппельных соединений с круглой резьбой. Это обусловлено технологичностью его изготовления. Данный фактор может оказать значительное влияние на внедрение изделия в серийное производство. В работе [8] проведено исследование, направленное на сравнение методов обработки и вы-

явление оптимального способа обработки. Наиболее производительным методом является точение стандартным резцом с переменной глубиной резания.

Проанализируем процесс деформирования соединений труб по гистерезисным диаграммам, имеющим

различия между линиями нагрузки и разгрузки, полученным на универсальной испытательной машине LFM при квазистатическом нагружении. Диаграмма построена в программе Origin на основе полученных в ходе эксперимента данных.

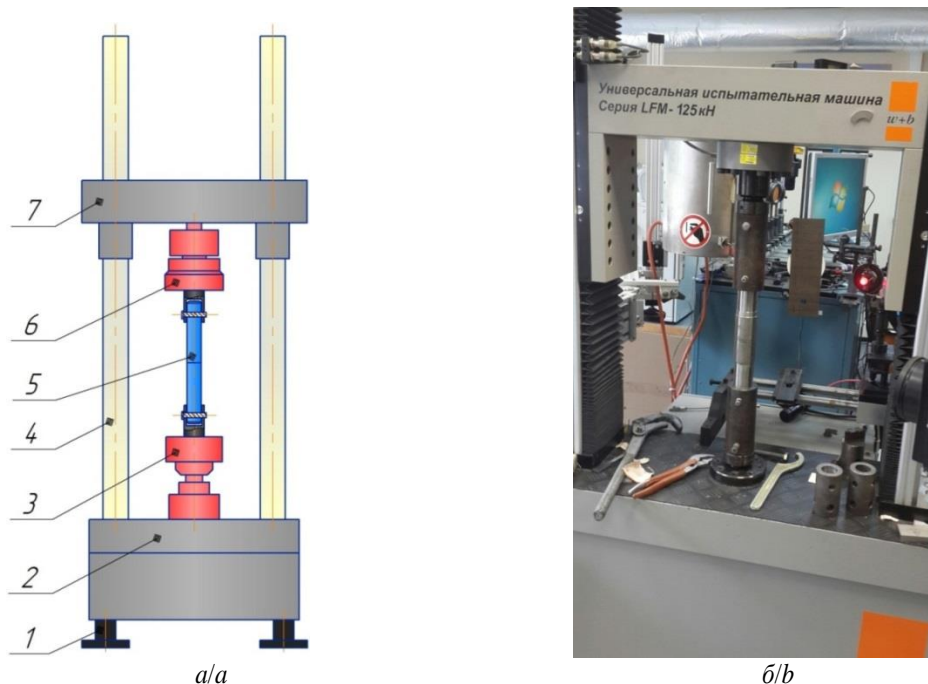


Рис. 2. а) структурная схема установки: 1 – регулируемые опоры; 2 – нижняя траверса; 3 – захватывающее устройство с датчиками силы; 4 – направляющие; 5 – резьбовое соединение; 6 – захват; 7 – верхняя траверса; б) снятие гистерезисных диаграмм при нагружении соединений буровых труб

Fig. 2. a) structural diagram: 1 – adjustable legs; 2 – lower traverse; 3 – gripping device with force sensors; 4 – guides; 5 – threaded connection; 6 – acquisition; 7 – upper traverse; б) reading of hysteresis diagrams under drill pipe connections loading

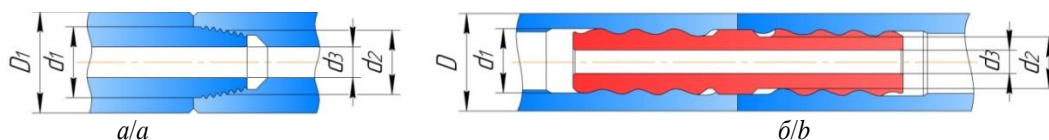


Рис. 3. Резьбовое соединение буровой колонны: а) замковое коническое; б) ниппельное с круглой резьбой

Fig. 3. Drill string threaded connection: а) lock conical connection; б) round-threaded nipple joint

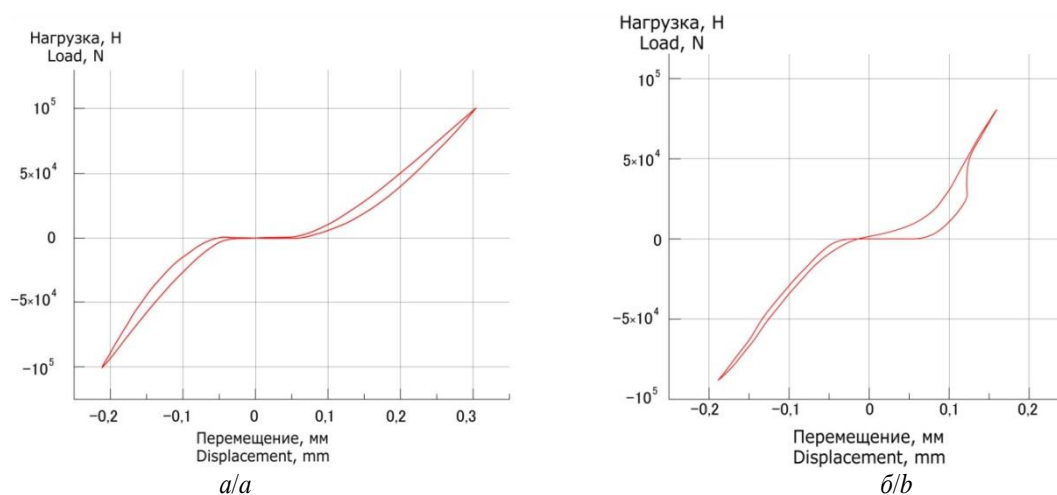


Рис. 4. Гистерезисные диаграммы: а) замкового соединения труб; б) ниппельного соединения с резьбой круглого профиля

Fig. 4. Hysteresis diagram of the: а) pipe lock connection; б) nipple connection with a round profile thread

Воздействующий на соединение труб силовой импульс вызывает относительное смещение витков резьбы. При этом возникающие силы трения совершают работу, определяющую долю потерь энергии в резьбовом соединении труб передаваемой волной упругой деформации.

Энергия, рассеянная за цикл деформирования резьбового соединения, выражается коэффициентом:

$$\Psi = \int_0^T F_d(x) \dot{x} dt.$$

Таким образом, подсчитав рассеянную энергию за один цикл деформирования, можно судить об эффективности соединения с точки зрения передачи импульса. Для сравнения потерь энергии полученные диаграммы условно разделены на два участка и подсчитаны площади каждого участка. Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица. Определение потерь энергии по площади петли гистерезисной диаграммы

Table. Determination of the energy loss by the area of the hysteresis diagram loop

Тип соединения Joint design	Растяжение, мм ² Stretching, mm ²	Сжатие, мм ² Compression, mm ²
Замковая резьба Tool-joint thread	276,2	262
Круглая резьба Right-handed round thread	687,86	172,2

Анализируя результаты, представленные в таблице, можно сделать выводы, что при передаче ударного импульса по трубам с ниппельным соединением с круглой резьбой потери энергии в соединении при сжатии существенно ниже, чем у замкового соединения. При цикле сжатия ниппельного соединения витки круглой резьбы высвобождаются, тем самым снижаются потери энергии при прохождении силового импульса. Но при растяжении ниппельного соединения на испытательной машине LFM потери энергии больше, что объяснить можно конструктивными особенностями этого соединения труб, и что не соответствует процессу прохождения силового импульса через соединение, когда растягивающее усилие фактически отсутствует.

Ниппель полностью скрыт внутри соединяемых труб, поэтому при сжатии, деформируясь в радиальном направлении, трубы снимают нагрузку в местах контакта сопряженных витков резьбы, сводя силы трения к минимуму. В замковых и муфтовых соединениях при продольном сжатии силы трения и потери энергии растут, что связано с радиальными деформациями элементов указанных резьбовых соединений. При этом, учитывая, что в силовых импульсах, формируемых бойком в буровой колонне, составляющая растяжения близка к минимуму, потерями энергии от нее для разрушения породы можно пренебречь.

Помимо результатов, полученных в ходе проведения экспериментов, еще одним фактором, позволяющим косвенно оценить эффективность применения ис-

следуемых типов соединений для вращательно-ударного бурения, является коэффициент конструктивного совершенства [4], его определяют по формуле:

$$k_c = \frac{2S_{\min}}{S_{\max} + S_{\min}},$$

где S_{\min} – минимальная площадь сечения штанги; S_{\max} – максимальная площадь сечения штанги.

Эталонным значением является $k_c \approx 1$ – при достижении данного коэффициента наблюдается минимальные потери энергии в соединении. Для исследуемых типов соединений получаем результаты, коэффициент конструктивного совершенства для соединения с замковой конической резьбой равен $k_c \approx 0,514$, для ниппельного соединения коэффициент конструктивного совершенства равен $k_c \approx 0,915$. Значительное влияние на данный коэффициент оказывает постоянство сечения буровой колонны, в том числе в месте соединения. Следует отметить, что в штангах с постоянным сечением максимальные напряжения снижаются на 20 %, при этом повышается стойкость бурового инструмента. Это объясняется отсутствием в них дополнительных отраженных импульсов, возникающих из-за перемены сечения. В связи с этим важно придерживаться постоянства сечения буровой колонны на всей длине колонны.

Выводы

1. Конструкции соединений буровых труб, которые применяются при вращательном способе горизонтально-направленного бурения пилотных скважин, непригодны для более эффективного вращательно-ударного бурения горных пород с перемежающейся твердостью либо грунтов с различными включениями повышенной твердости. Это связано с тем, что резьбовые соединения «труба в трубу» без отдельного соединительного элемента (муфты или ниппеля) неизбежно имеют участки труб с увеличением поперечного сечения, от которых происходит отражение волн деформации. При этом не только существенно снижается коэффициент передачи энергии удара по буровой колонне, но и надежность работы резьбовых соединений труб, в которых резко возрастают напряжения из-за наложения прямых и отраженных волн деформации. При распространении волн деформации через соединения труб потери энергии происходят также в процессе контактного взаимодействия витков резьбы, вызывая при этом их износ и нагрев труб в местах соединений, что связано с работой сил неупругого сопротивления. Получены экспериментальные результаты указанного вида потерь энергии на основе построения гистерезисных диаграмм. Полученные экспериментальные результаты подтвердили, что благодаря предусмотренным в круглой резьбе зазорам работа сил неупругого сопротивления, а следовательно потери энергии при передаче силового импульса сжатия через ниппельное соединение буровых труб в 1,5 раза ниже, чем при соединении «труба в трубу».

2. Результаты проведенных исследований позволили выполнить анализ эффективности предлагаемых соединений бурильных труб с установленными внутри ниппелями. Отличительной особенностью разработанной конструкции является то, что благодаря зазорам между сопряженными витками круглой резьбы есть возможность заданного ограниченного перемещения ниппеля относительно резьбовых участков труб при прохождении через соединение ударного импульса и вместо существенной деформации ниппеля происходит его относи-

тельное смещение с возвращением в исходное положение в результате динамических процессов, действующих в соединении бурильных труб. Ранее проведенные производственные испытания подобных соединений на Хайдарканском горнорудном комбинате одним из соавторов данной публикации (д-ром техн. наук. Л.А. Саруевым) убедительно доказали прочность, надежность и эффективность рассматриваемых соединений. За время проведения производственных испытаний не вышло из строя ни одно ниппельное соединение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бер А.А., Епихин А.В., Бер Л.М. Установки горизонтально-направленного бурения: учебный справочник. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 208 с.
2. Алимов О.Д., Манжосов В.К., Еремьянц В.Э. Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах. – М.: Наука, 1985. – 358 с.
3. Пучинян С.Г. Исследование и создание методики расчета сложнагруженных резьбовых соединений: дис. ... канд. техн. наук. – Фрунзе, 1989. – 162 с.
4. Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
5. Шадрина А.В. Теоретические и экспериментальные исследования волновых процессов в колонне труб при бурении скважин малого диаметра из подземных горных выработок: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2009. – 19 с.
6. Перспективы развития технологии и техники горизонтально-направленного бурения пилотных скважин для бестраншейной прокладки трубопроводов / Л.А. Саруев, А.В. Шадрина, А.Л. Саруев, С.С. Васенин, А.В. Пахарева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 4. – С. 89–97.
7. Rock drilling equipment; left-hand rope threads. ISO 10208. 1991. URL: <https://www.iso.org/standard/18240.html> (дата обращения 11.10.2020).
8. Некрасов С.С., Криворучко Д.В., Нешта А.А. Способы обработки круглой резьбы // Оборудование и инструмент для профессионалов: Металлообработка. – 2013. – № 4. – С. 86–88.
9. Development of gas-tight threads based on API round threads and its evaluation / Y. Zhang, Li Liu, Jinfu Lu, Zhifu Yin, Ke Wang, Jie Liu, Chuan Ta // Natural Gas Industry B. – 2017. – V. 4. – Iss. 6. – P. 463–469.
10. Erbao P., Guotong Zh. Image processing technology research of on-line thread processing // Energy Procedia: International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems. – 2012. – V. 17. – P. 1408–1415.
11. Melnov K.V. Improvement of the structure of the force pulse formation mechanism applied in horizontal directional drilling // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – V. 21. – P. 58–60.
12. Thread coupling for a drill string for percussive rock drilling: Patent WO 2000019056. Fil. 22.09.1999; Publ. 06.04.2000.
13. Федоров С.К. Повышение долговечности переводников и бурильных труб электромеханической обработкой / С.К. Федоров, Л.В. Федорова, Ю.С. Иванова, М.В. Воронина, А.В. Садовников, В.Н. Никитин // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 539–546.
14. Female part and a method for manufacturing female parts: Patent 8245798 USA. Fil. 18.06.2009; Publ. 21.08.2012.
15. Baragetti S., Clerici P. Friction and tightening force of conical threaded connections: experiments in various conditions // International Journal of Materials and Product Technology. – 2003. – V. 19. – Iss. 5. – P. 414–430.
16. Macdonald K.A., Deans W.F. Stress analysis of drill string threaded connections using the finite element method // Engineering Failure Analysis. – 1995. – V. 2. – Iss. 1. – P. 1–30.
17. Experimental research of stress field distribution on API round thread casing connection / L. Wang, R.-X. Zhang, J.-X. Zou, Y. Zang // Journal of University of Science and Technology Beijing. Mineral, Metallurgy, Material. – 2000. – V. 22. – Iss. 6. – P. 555–558.
18. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection / Y. Guangjie, Y. Zhenqiang, W. Qinghua, T. Zhentong // Engineering Failure Analysis. – 2006. – V. 13. – Iss. 8. – P. 1275–1284.
19. Resonant test rigs for fatigue full scale testing of oil drill string connections / L. Bertini, M. Beghini, C. Santus, A. Baryshnikov // International Journal of Fatigue. – 2008. – V. 30. – Iss. 6. – P. 978–988.
20. Van Wittenberghe J., De Baets P., De Waele W. Modeling of preloaded threaded pipe connections // 8th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics. – Brussels, Belgium, 2009. – P. 149–156.

Поступила 09.12.2020 г.

Информация об авторах

Саруев Л.А., доктор технических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Мельнов К.В., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Шадрина А.В., доктор технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Гончаров Н.В., кандидат технических наук, доцент кафедры строительных и дорожных машин Механо-технологического факультета, Томский государственный архитектурно-строительный университет.

Саруев А.Л., кандидат технических наук, доцент отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

UDC 621.644

RESEARCH OF POWER IMPULSES TRANSFER THROUGH THREADED CONNECTIONS OF THE DRILL-STRING DURING ROTARY-PERCUSSION DRILLING OF PILOT HOLES FOR TRENCHLESS PIPELINE LAYING

Lev A. Saruev¹,
saruevla@tpu.ru

Kirill V. Melnov¹,
kvm11@tpu.ru

Anastasiya V. Shadrina¹,
kr_nas_sh@tpu.ru

Nikolay V. Goncharov²,
nv.goncharov@mail.ru

Aleksey L. Saruev¹,
saruev@tpu.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, bld. 2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

The relevance of the research. Pilot wells for horizontal directional drilling can be attributed to slim holes that are widely used in mining, in particular, for detailed exploration and underground development of non-ferrous metal ores, for degassing mine workings of coal mines, as well as in a lot of other industries to limit the diameter of a hole due to technological or technical conditions. Moreover, to obtain effective drilling of slim holes in rocks with high alteration in hardness, drilling rigs are equipped with percussion mechanisms forming force impulses in a drill-string in the form of elastic deformation waves propagating at sound speed through drill pipes threaded connections towards a rock-breaking tool. Such energy transfer of power impulses is accompanied by its dissipation in the threaded connections. Thereat if the connections of drill pipes are intended only for rotary drilling the energy loss of power impulses in them may be unacceptably large, and efficiency and strength are significantly reduced. Though the threaded connections are considered to be stationary, in reality while simultaneous loading of them by torque, drilling tool feed thrust and power impulses a small slip inevitably arises on the contact surfaces of the elements of drill pipes connections. Friction force works on this relative travel causing energy loss that can be quantified experimentally. Without a clear understanding of the rules of power impulses propagation through threaded connections, it is impossible to assess objectively the possibilities of the efficiency increase of the transfer of their energy on a drill-string to the rock-breaking tool, and therefore, in general at all, the reasonableness of using percussion mechanisms in installations for horizontally directed drilling of pilot wells. Thus, the scientific substantiation and development of recommendations for designing and creating new designs of threaded connections of the drill-strings to improve the efficiency of the rotary-percussion method of drilling slim holes are the urgent scientific and technical task.

The aim of the research is to analyze the dynamic processes in the threaded connections of a drill-string during the transfer of the power impulses from the percussion node to the rock-breaking tool; to build hysteresis diagrams which allow assessing the energy loss associated with the work of inelastic resistance force at the contact places of the mated parts of the threaded connections during the propagation of the power impulses through them based on the experiments performed; to show by examples the futility of attempts to achieve the effective transfer of the power impulses through the connections of the drill pipes that are used for rotary drilling and to substantiate the recommendations on the development of fundamentally new nipple connections of the pipes proposed by the National Research Tomsk Polytechnic University for drilling the pilot wells that have previously successfully passed production tests at non-ferrous metallurgy mines in Kyrgyzstan and Kazakhstan with the direct participation of the authors in the rotary-percussion drilling of slim holes from underground mine workings.

The object of this study is drill-strings with coupling and nipple connections, used in the rotary-percussion method of drilling wells, as well as the threaded connections of the pipes for the pilot wells for horizontal directional drilling.

Methodology: the review of scientific literature on formation of the percussion impulses, the transfer of the waves of deformation on a drill-string; the substantiation of the use of the rotary-percussion method of drilling for horizontal directional drilling as well as the comparison of research results and the assessment of energy friction loss in the threaded connections of the drill pipes.

Findings. Based on the percussion-wave theory previously unknown interrelations were obtained which allowed running the computer simulation of threaded connections parameters influence on the efficiency of the power impulses transfer on a drill-string. The main cause of impulses energy loss was found to be the forces of inelastic resistance occurring in case of the relative displacement of the drill pipes and the connecting elements. To increase the transfer ratio of the amplitude of the power and the energy of the impulses it is necessary to take the minimum possible value of connecting element rigidity as well as to increase the contact stiffness of the conjugate turns of the threaded connection. Currently used drill pipes connections for horizontal directional drilling of wells are not suitable for rotary-percussion drilling due to the reflection of the deformation waves from the sections of the threaded connections of the drill pipes without connecting elements (couplings or special closed-type nipples).

Key words:

Horizontal directional drilling, rotary-percussion drilling technology, power impulse transmission, pilot bore, drill-string, threaded connection.

REFERENCES

1. Ber A.A., Epikhin A.V., Ber L.M. *Ustanovki gorizontarno-napravlennoogo bureniya: uchebny spravochnik* [Horizontal directional drilling rig: academic guide]. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2018. 208 p.
2. Alimov O., Manzhosov V., Eremyants V. *Udar. Rasprostraneniye voln deformatsiy v udarnykh sistemakh* [Impulse. The propagation

- of strain waves in percussion system]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 357 p.
3. Puchinyan G.S. *Issledovanie i sozdanie metodiki rascheta slozhnonagruzhennykh rezbovykh soedineniy*. Dis. Kand. nauk [Research and calculation method development of thread connections under complex loading. Cand. Diss.]. Frunze, 1989. 162 p.
 4. Ivanov K.I. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Drilling technique for exploitation of mineral deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 272 p.
 5. Shadrina A.V. *Teoreticheskie i eksperimentalnye issledovaniya volnovykh protsessov v kolonne trub pri burenii skvazhin malogo diametra iz podzemnykh gornykh vyrabotok*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Theoretical and experimental studies of wave propagation in a pipe string during small-diameter wells drilling from underground digging. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2009. 19 p.
 6. Saruev L.A., Shadrina A.V., Saruev A.L., Vasenin S.S., Paharev A.V. Prospects for development of technology and facilities of pilot bores horizontal directional drilling for trenchless laying of pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 4, pp. 89–97. In Rus.
 7. *Rock drilling equipment; left-hand rope threads*. 1991. Available at: <https://www.iso.org/standard/18240.html> (accessed 11 October 2020).
 8. Nekrasov S.S., Krivoruchko D.V., Neshta A.A. Sposoby obrabotki krugloy rezbey [Round thread processing methods]. *Oborudovanie i instrument dlya professionalov: Metalloobrabotka*, 2013, no. 4, pp. 86–88.
 9. Zhang Y., Liu Li, Lu Jinfu, Yin Zhifu, Wang Ke, Liu Jie, Ta Chuan. Development of gas-tight threads based on API round threads and its evaluation. *Natural Gas Industry B*, 2017, vol. 4, Iss. 6, pp. 463–469.
 10. Erbao P., Guotong Zh. Image processing technology research of on-line thread processing. *International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems. Energy Procedia*, 2012, vol. 17, pp. 1408–1415.
 11. Melnov K.V. Improvement of the design of the mechanism for the formation of force impulses used in horizontal directional drilling. *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2020, Iss. 21, pp. 58–60. In Rus.
 12. Sandtröm R. *Thread coupling for a drill string for percussive rock drilling*. Patent WO 2000019056 USA, 2000.
 13. Fedorov S.K., Fedorova L.V., Ivanova Yu.S., Voronina M.V., Sadovnikov A.V., Nikitin V.N. Increasing the durability of subs and drill pipes by electromechanical processing. *Notes of the Mining Institute*, 2018, vol. 233, pp. 539–546. In Rus.
 14. Nava P., Sörensen P. *Female part and a method for manufacturing female parts*. Patent 8245798 USA, 2012.
 15. Baragetti S., Clerici P. Friction and tightening force of conical threaded connections: experiments in various conditions. *International Journal of Materials and Product Technology*, 2003, vol. 19, Iss. 5, pp. 414–430.
 16. Macdonald K.A., Deans W.F. Stress analysis of drill string threaded connections using the finite element method. *Engineering Failure Analysis*, 1995, vol. 2, Iss. 1, pp. 1–30.
 17. Wang L., Zhang R.-X., Zou J.-X., Zang Y. Experimental research of stress field distribution on API round thread casing connection. *Journal of University of Science and Technology Beijing. Mineral, Metallurgy, Material*, 2000, vol. 22, Iss. 6, pp. 555–558.
 18. Guangjie Y., Zhenqiang Y., Qinghua W., Zhentong T. Numerical and experimental distribution of temperature and stress fields in API round threaded connection. *Engineering Failure Analysis*, 2006, vol. 13, Iss. 8, pp. 1275–1284.
 19. Bertini L., Beghini M., Santus C., Baryshnikov A. Resonant test rigs for fatigue full scale testing of oil drill string connections. *International Journal of Fatigue*, 2008, vol. 30, Iss. 6, pp. 978–988.
 20. Van Wittenberghe J., De Baets P., De Waele W. Modeling of preloaded threaded pipe connections. *8th National Congress on Theoretical and Applied Mechanics*. Brussels, Belgium, 2009. pp. 149–156.

Received: 9 December 2020.

Information about the authors

Lev A. Saruev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Kirill V. Melnov, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anastasiya V. Shadrina, Dr. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Nikolay V. Goncharov, Cand Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

Aleksey L. Saruev, Cand Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК 621.313.332

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ДЛЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ КОНДЕНСАТОРНОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Буньков Дмитрий Сергеевич¹,
bunkovds@tpu.ru

Глазырин Александр Савельевич^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Боловин Евгений Владимирович²,
orange@tpu.ru

Крохта Юрий Владимирович¹,
yuriy.krokhta@gmail.com

Баннов Дмитрий Михайлович⁴,
bannov.dm@samgtu.ru

Ковалев Владимир Захарович³,
vz_kovalev@mail.ru

Хамитов Рустам Нуриманович^{5,6},
apple_27@list.ru

Кладиев Сергей Николаевич²,
kladiev@tpu.ru

Ланграф Сергей Владимирович⁷,
sergeylgrf@gmail.com

Леонов Андрей Петрович²,
leonov_ap@tpu.ru

¹ ООО «Элетим»,
Россия, 634021, г. Томск, ул. Алтайская, 161А.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

³ Югорский государственный университет,
Россия, 628012, г. Ханты-Мансийск, ул. Чехова, 16.

⁴ Самарский государственный технический университет,
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.

⁵ Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11.

⁶ Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

⁷ ООО «НПФ Мехатроника-Про»,
Россия, 634021, г. Томск, пр. Фрунзе, 119Е.

Актуальность. Доля электроэнергии, вырабатываемой установками на основе возобновляемой энергии, постоянно растет, в связи с чем потребность в развитии систем питания и автоматического управления электрическими машинами, лежащими в основе ветро- и гидрогенераторов, не теряет актуальности. В составе таких генераторных установок переменного тока применяют синхронные электрические машины, асинхронные машины с фазным и короткозамкнутым ротором. Преобразователи частоты, устанавливаемые в статорные и роторные цепи асинхронных машин переменного тока, позволяют управлять процессами их возбуждения, однако для начала генерации требуется использовать дополнительные внешние источники питания. Благодаря остаточному намагничиванию в магнитопроводе можно обеспечить процесс гарантированного самовозбуждения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с помощью подключения батарей конденсаторов к ее статорным обмоткам без применения дополнительного внешнего источника питания. Предложенный способ нестационарного конденсаторного возбуждения позволяет обеспечить адаптацию генераторной установки к изменению режимов работы в условиях децентрализованного электроснабжения.

Цель: исследовать предложенную систему стабилизации напряжения асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с варьлируемым конденсаторным возбуждением в составе источника возобновляемой энергии.

Методы: теоретические – теория дифференциальных уравнений, методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, теория электропривода, теория электрических машин, численные методы аппроксимации данных, и экспериментальные – проведение испытаний асинхронной электрической машины с нестационарным конденсаторным возбуждением на разработанном испытательном стенде с целью получения нагрузочных характеристик и осциллограмм напряжений на обмотках статора асинхронных машин с короткозамкнутым ротором в различных режимах работы, методы исследования.

Результаты. Разработана и изготовлена оригинальная экспериментальная установка с узлом, имитирующим работу турбины. Электромеханический преобразователь энергии выполнен в виде асинхронной машины с короткозамкнутым ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением. Блок управления установкой выполнен в виде интегрированного с силовым блоком гальванически развязанного модуля во влагостойком исполнении с применением беспроводного интерфейса связи Bluetooth. Описан и протестирован способ коммутации батарей конденсаторов с применением тиристоров в качестве управляемого ключа с двухсторонней проводимостью. Анализ полученных нагрузочных характеристик показывает принципи-

альную возможность обеспечить гарантированную выработку электроэнергии со стабилизацией напряжения в допустимых пределах изменения мощности нагрузки. Примененная в составе экспериментальной установки система автоматической коммутации конденсаторов с варьруемой в зависимости от потребляемой мощности емкостью позволила обеспечить приемлемое время динамической реакции на возмущающее воздействие при нестационарной нагрузке.

Ключевые слова:

Возобновляемые источники энергии, асинхронная машина, короткозамкнутый ротор, нестационарное конденсаторное возбуждение, децентрализованное электроснабжение.

Введение

Электромеханические преобразователи энергии на основе асинхронных машин (АМ) с короткозамкнутым (КЗ) ротором с конденсаторным возбуждением входят в состав ветроэнергетических установок (ВЭУ) [1, 2] и микро-гидроэлектростанций (микро-ГЭС) [3, 4].

Широкому распространению и массовому повсеместному внедрению ВЭУ препятствуют такие известные их недостатки, как инфразвуки, шумы, большая стоимость, долгая окупаемость, плохая ремонтпригодность для установок средней и высокой мощности [5–10]. В то же время существуют экономически оправданные районы применения ВЭУ, среди которых на территории РФ в первую очередь стоит отметить центральные районы Горного Алтая [11] и некоторые районы республики Саха (Якутия) [12, 13].

Ветроэнергетические ресурсы для центральных районов Горного Алтая в верхнем поясе гор оцениваются в пределах от 200 до 500 Вт/м² удельной мощности для зон с малой энергетикой, располагающихся на наветренных склонах и водоразделах выше 1500 м над уровнем моря [11, 14]. Бесперспективными для размещения ВЭУ являются днища межгорных котловин, подветренные склоны и узкие горные долины, ориентированные перпендикулярно преобладающему направлению ветров [15].

Проведенный кластерный анализ республики Саха (Якутия) показал, что существуют также перспективные с точки зрения ветроэнергетики районы с высоким значением потенциала энергии ветра и являющиеся наиболее оправданными для внедрения ветроэнергетических установок [12, 13].

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) на основе микро-ГЭС характеризуются относительно высокими первоначальными затратами [16], связанными с адаптацией оборудования к рельефу местности, гидрологическим характеристикам водного источника. Для рек бассейна Томи характерным является высокое значение уклонов и водной поверхности во все фазы водного режима, как в многоводные, так и в маловодные годы [17]. Наибольшей энергией обладают потоки, формирующиеся на западных склонах Кузнецкого Алатау: р. Тутуяс ($442 \cdot 10^6$ кВт·ч/год), р. Тайдон ($528 \cdot 10^6$ кВт·ч/год), а также в Горной Шории – р. Тельбес ($1226 \cdot 10^6$ кВт·ч/год), что легко объясняется значительным перепадом высот и водности потоков. В современном мире для малой гидроэнергетики рекомендуется использовать поперечно струйные или двукратные гидротурбины [17–19], а также перспективным является применение микро-ГЭС рукавного типа [16, 20].

На сегодняшний день наиболее распространены и массово применяются описанные далее типы электротехнических комплексов ВИЭ на основе ВЭУ и микро-ГЭС [21], имеющих свои преимущества и недостатки [22].

К основным преимуществам электротехнического комплекса (ЭТК), включающего синхронную электрическую машину с возбуждением от постоянных магнитов, выпрямитель, DC/DC преобразователь и автономный инвертор напряжения (АИН) [23], относятся:

- 1) высококачественное возбуждение при применении постоянных магнитов с высокой коэрцитивной силой;
- 2) отсутствие подвижных токоведущих частей;
- 3) формирование электронной системой стабилизации высококачественных синусоидальных сигналов в широком диапазоне скоростей ветра;
- 4) возможность экстремальной настройки по отбору мощности.
- 5) К недостаткам данного электротехнического комплекса относятся:
- 6) дополнительное снижение КПД за счет многократного преобразования энергии;
- 7) высокая стоимость синхронной машины из-за применяемых в ее составе высококачественных магнитных материалов
- 8) отсутствие возможности регулирования реактивной мощности на низких значениях угловой скорости турбины;
- 9) необходимость применения повышающего DC/DC преобразователя.

ЭТК на основе синхронной электрической машины с постоянными магнитами являются наиболее универсальными источниками питания для малой возобновляемой энергетики.

Другим распространенным типом является ЭТК на основе АМ двойного питания, выпрямителя, DC/DC преобразователя и АИН, подключенного в роторную цепь. Преимущества этого ЭТК:

- 1) отсутствие повышающего DC/DC преобразователя;
- 2) высококачественное электромагнитное возбуждение за счет регулирования энергии скольжения с помощью ПЧ, установленного в роторную цепь;
- 3) отсутствие необходимости в дополнительной фильтрации напряжения, снимаемого со статора, так как АМ выступает в качестве своеобразного фильтра низких частот, подавляющего ШИМ сигнал;
- 4) приемлемый отбор мощности, осуществляемый в достаточно широком диапазоне частот вращения турбины;

5) возможность экстремальной настройки системы управления по отбору мощности [24].

Недостатки этого ЭТК:

- 1) значительное количество потребляемой электроэнергии, расходуемой на собственные нужды генераторной установки;
- 2) необходимость применения повышающего редуктора;
- 3) наличие подвижных токоведущих частей.

В области малой автономной энергетики особенностью ЭТК на основе АМ с КЗ ротором с конденсаторными батареями в цепях статора является гарантированное самовозбуждение генератора в режиме холостого хода. Преимущества этого ЭТК:

- 1) самая надежная и дешевая машина переменного тока, способная выдерживать кратковременные механические и электрические перегрузки;
- 2) возможность обезопасить подключаемую нагрузку и сам генератор в случае возникновения режимов короткого замыкания, вызывающего срыв генерации напряжения благодаря особенностям конструкции АМ с КЗ ротором;
- 3) возможность работы установки без дорогостоящего силового преобразователя.

Недостатки этого ЭТК:

- 1) необходимость поддержания постоянной частоты вращения вала АМ с КЗ ротором;
- 2) необходимость обеспечения гарантированного процесса самовозбуждения до подключения нагрузки;
- 3) невозможность обеспечения стабилизации выходного напряжения при изменении нагрузки;
- 4) вероятность возникновения избыточного механического перенапряжения в рабочем колесе гидротурбины при срыве генерации напряжения.

Рассмотренный в данной статье способ нестационарного конденсаторного возбуждения АМ с КЗ ротором позволяет обеспечить стабилизацию выходного напряжения энергетической установки при изменении нагрузки при постоянной частоте вращения.

Принципы функционирования генераторной установки с нестационарным конденсаторным возбуждением

Предложенный тип генераторной установки для возобновляемой энергетики на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением представлен на функциональной схеме (рис. 1).

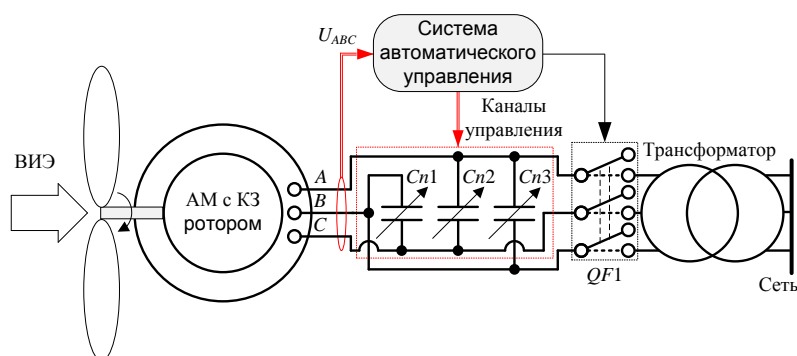


Рис. 1. Функциональная схема генераторной установки на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением

Fig. 1. Functional diagram of squirrel-cage induction generator with non-stationary capacitive excitation

Турбина энергетической установки (рис. 1) приводится во вращение за счет энергии водяного потока или ветра. Важным условием применения предложенной энергетической установки является стабильная частота вращения вала АМ с КЗ ротором, что гарантирует номинальную частоту генерируемого напряжения. Постоянство частоты вращения вала АМ с КЗ ротором для ВЭУ обеспечивается системой аэродинамического регулирования, например, за счет срыва потока воздуха или поворота лопастей. Постоянство напора и расхода воды через турбину микро-ГЭС обеспечивается стабилизацией механического момента на приводном валу электрической машины. Для поддержания номинального уровня частоты генерируемого напряжения кроме этого необходимо обеспечить стабилизацию потребляемой активной мощности. Нестационарное конденсаторное возбуждение обеспечивается тремя регулируемыми конденсаторными батареями, соединенными в треугольник параллельно выводам А, В, С статора АМ с КЗ ротором. Контакт QF1 коммутирует обмотки статора

с первичными обмотками трансформатора, работающего на систему децентрализованного электроснабжения, после завершения процесса самовозбуждения АМ с КЗ ротором. Трансформатор обеспечивает гальваническую развязку и согласование цепей энергетической установки и питаемой сети. Система автоматического управления (САУ) регулирует емкость конденсаторных батарей согласно уровню напряжения U_{ABC} , измеряемого на выходах А, В, С АМ с КЗ ротором. Подключение конденсаторных батарей по схеме треугольник обусловлено работой на симметричную активную нагрузку. Для той же мощности нагрузки, но при несимметричном ее потреблении, рациональнее применять соединение конденсаторных батарей звездой, что дает возможность независимого регулирования напряжения каждой фазы, однако при этом необходимо применять конденсаторы большей емкости.

Устройство конденсаторной батареи, применяемой в составе генераторной установки (рис. 1), представлено на рис. 2.

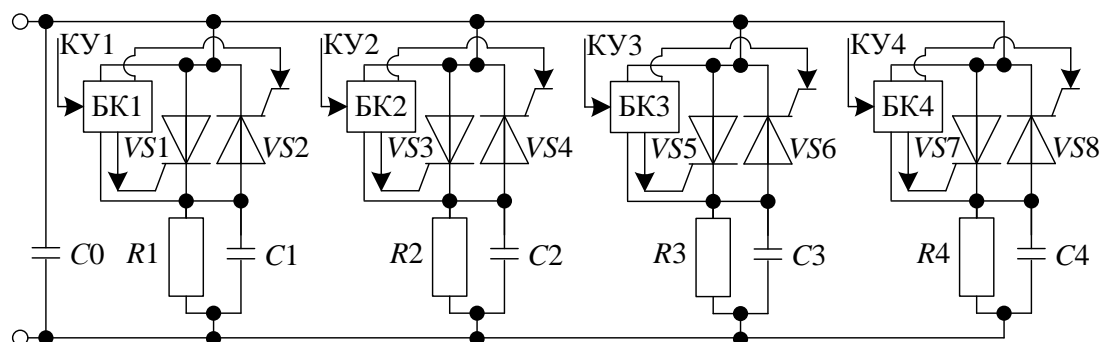


Рис. 2. Схема соединения элементов конденсаторной батареи, включающей четыре коммутлируемые конденсаторные стойки

Fig. 2. Schematic diagram of capacitor bank elements, including four switched capacitor branch

В представленной в качестве примера четырехступенчатой конденсаторной батарее (рис. 2) присутствует некоммутируемый базовый конденсатор C_0 с емкостью, обеспечивающей гарантированное самовозбуждение АМ с КЗ ротором и номинальный уровень выходного напряжения на холостом ходу до момента подключения питаемой полезной нагрузки контактором $QF1$ (рис. 1). Силовая регулируемая часть конденсаторной батареи, состоящая из ряда управляемых конденсаторных стоек, включает коммутлируемые конденсаторы $C1-C4$. Номиналы коммутлируемых конденсаторов и число конденсаторных стоек согласуются с параметрами используемой АМ с КЗ ротором и подбираются таким образом, чтобы обеспечить дискретное регулирование суммарной емкости конденсаторной батареи с шагом, позволяющим стабилизировать генерируемое напряжение с требуемой точностью. Управление подключенными встречно-параллельно тиристорами $VS1-VS8$, коммутирующими конденсаторы $C1-C4$, организуется каналами управления $KY1-KY4$, на которые поступают сигнала

лы от системы управления на замыкание конденсаторной стойки. Управляющие импульсы от каналов управления поступают на соответствующие блоки коммутации $БК1-БК4$, непосредственно обеспечивающие корректный алгоритм коммутации тириستоров. Резисторы $R1-R4$, имеющие номинал порядка сотен кОм, применяются для плавного разряда конденсаторов $C1-C4$ после полного выключения устройства.

Подключение тиристорами конденсаторов $C1-C4$ к статорным обмоткам АМ в произвольные моменты времени может приводить к скачкообразному нарастанию тока. Максимальные броски тока проявляются при коммутации полностью заряженных ранее подключавшихся к статорным обмоткам АМ конденсаторов в моменты времени, когда к тиристорам прикладывается наибольшая разность потенциалов. Высокая скорость нарастания тока в цепи коммутируемого конденсатора может приводить к мгновенному перегреву полупроводниковой структуры тиристора и его выходу из строя, для предотвращения чего применяется блок коммутации (рис. 2).

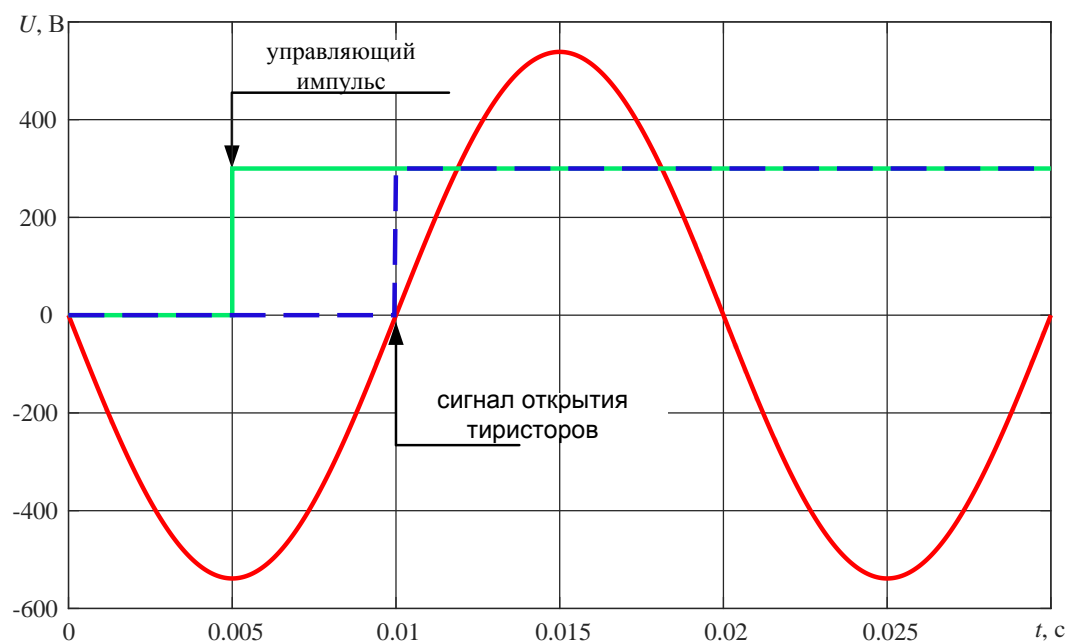


Рис. 3. Временная диаграмма, иллюстрирующая задержку импульса для коммутации тиристорного ключа

Fig. 3. Timing diagram showing the pulse delay of switching the thyristor

Рис. 3 демонстрирует алгоритм работы блока коммутации (рис. 2) в произвольной конденсаторной стойке при подключении конденсатора, который ранее не задействовался системой управления и был полностью разряжен. Красный синусоидальный сигнал (рис. 3) иллюстрирует линейное напряжение, генерируемое на обмотках АМ с КЗ ротором между двумя произвольными фазами и прикладываемое к подключенным встречно-параллельно тиристорам соответствующей конденсаторной стойки. В произвольный момент времени автоматической системе управления требуется ввести в работу данную конденсаторную стойку, для чего подается управляющий сигнал на соответствующий канал управления (рис. 3). Блок коммутации конденсаторной стойки, который целесообразно реализовать на специализированной оптопаре, оценивает приложенное к тиристорному ключу напряжение. В момент времени, когда приложенное к тиристорному ключу напряжение близко к нулю, блок коммутации выдает сигнал для открытия тириستоров (рис. 3) соответствующей конденсаторной стойки. Коммутация тиристорного ключа происходит при приложении к нему близкой к нулю разности потенциалов, в связи с чем заряд подключенного конденсатора происходит плавно

без броска тока и перегрузок использующегося тиристорного ключа. Отключение любой из конденсаторных стоек может производиться в произвольный момент времени и не требует согласования системы управления с блоком коммутации, который при необходимости закрыть тиристорный ключ выдает соответствующий управляющий потенциал без задержек.

Согласно ГОСТ Р 56124.2-2014 «Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации» не предъявляется жестких требований к качеству напряжения в электросети на основе ВИЭ [25]. Таким образом, система управления, входящая в состав генераторной установки, должна обеспечивать стабилизацию выходного напряжения, формируемого генератором на основе АМ с КЗ ротором, при резком сбросе, набросе или плавном изменении питаемой нагрузки в диапазоне рабочих мощностей с отклонением, не превышающим допустимого уровня для питающих электросетей. Основой системы автоматического управления, обеспечивающей стабилизацию генерируемого напряжения, является предложенный в данной статье алгоритм с применением релейного дискретного регулятора (рис. 3).

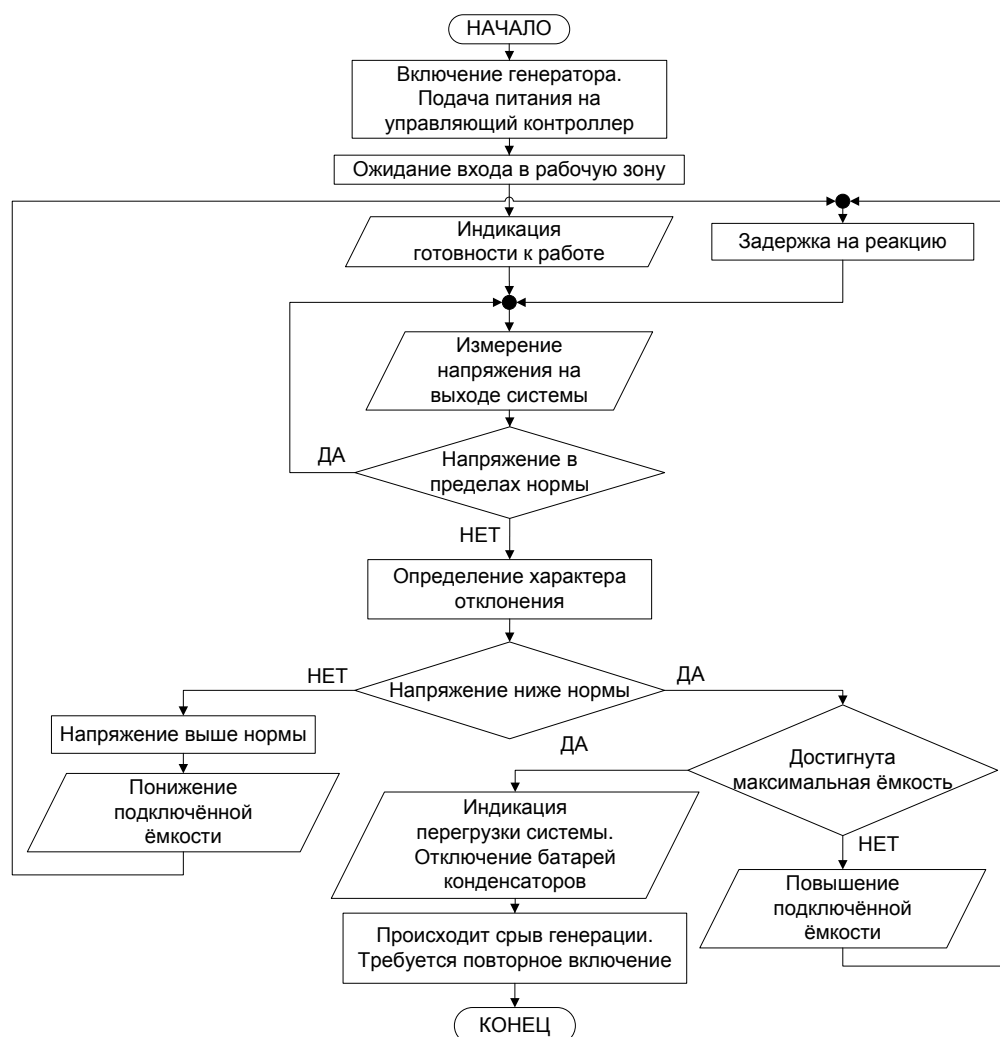


Рис. 4. Блок-схема алгоритма стабилизации генерируемого напряжения
 Fig. 4. Block diagram of the generated voltage stabilization algorithm

При достижении валом АМ с КЗ ротором скорости, близкой к номинальной, за счет остаточного намагничивания и наличия базовой некоммутируемой емкости C_0 (рис. 2) начинается генерация напряжения, часть которого тратится на собственные нужды, а именно на питание системы автоматического управления. При превышении измеряемым фазным напряжением нижней границы рабочей зоны, заданной на уровне 80 В, алгоритм стабилизации вступает в работу. Задачей алгоритма является стабилизация напряжения в зоне допустимых отклонений, в диапазоне от 210 до 230 В. Если измеряемое напряжение опускается ниже зоны допустимых отклонений, происходит увеличение суммарной емкости конденсаторной батареи на 1 мкФ (рис. 2), что позволяет компенсировать провал напряжения. Если измеряемое напряжение поднимается выше зоны допустимых отклонений, соответственно происходит уменьшение суммарной емкости конденсаторной батареи на 1 мкФ (рис. 2),

так как текущий уровень подключенной суммарной емкости являлся для системы избыточным.

Предусмотренная в алгоритме задержка на реакцию системы при правильной настройке позволяет избежать избыточного перерегулирования и колебательности стабилизируемого напряжения. В алгоритме также предусмотрен механизм диагностики и оповещения о срыве генерации напряжения, что может быть, к примеру, вызвано токовой перегрузкой в линии питаемой сети.

Исследование процесса стабилизации напряжения генераторной установки на основе имитационной модели

Для проверки принципиальной работоспособности описанных в статье схмотехнических решений и алгоритмов, которые должны обеспечивать работу генератора на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением, было произведено имитационное моделирование в программной среде *MatLab Simulink* (рис. 5).

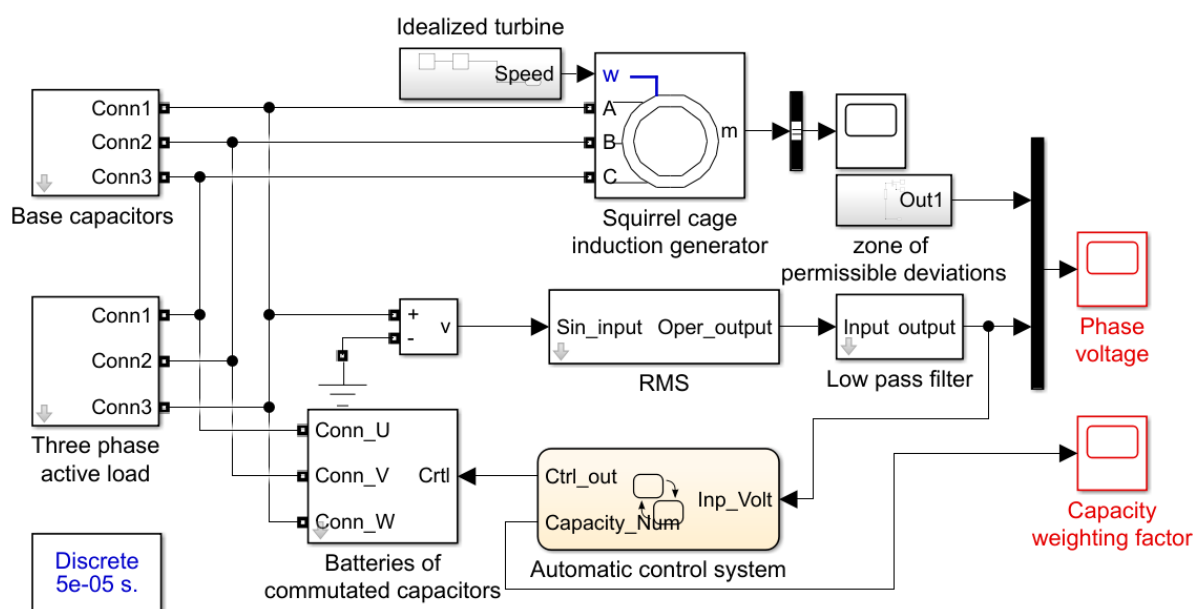


Рис. 5. Имитационная модель электрогенератора на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением, полезной нагрузкой и автоматической системой управления

Fig. 5. Simulation model of an electric generator based on squirrel-cage induction generator with non-stationary capacitor excitation, load and automatic control system

Имитационная модель электрогенератора (рис. 4) включает АМ с КЗ ротором (*Squirrel cage induction generator*) с варьируемыми параметрами номинальной мощностью 5,5 кВт, угловая скорость вращения вала которой плавно выводится на номинальный уровень и поддерживается идеализированной моделью турбины (*Idealized turbine*). Для проявления эффекта самовозбуждения при взаимодействии с базовыми конденсаторами (*Base capacitors*) с номиналом 15 мкФ в модели асинхронной машины с КЗ ротором требуется задать ненулевые начальные условия. Для генерации корректного уровня напряжения в модели также требуется задать кривую намагничивания АМ, близкую к основной кривой намагничивания исследуемой АМ. В модели присутствуют коммутируемые тиристорными ключами конденсаторные батареи

(*Batteries of commutated capacitors*), конденсаторные стойки которых имеют номиналы 1, 2, 4 и 8 мкФ соответственно. Управление конденсаторными батареями организуется системой автоматического управления (*Automatic control system*). Для проверки работоспособности механизма стабилизации генерируемого напряжения в модели предусмотрена симметричная трехфазная активная нагрузка, соединенная треугольником, номинальной мощностью 2 кВт, коммутация которой производится идеальными ключами. Сигнал обратной связи в виде мгновенных значений одного из измеряемых фазных напряжений поступает на вход блока расчета действующего уровня напряжения (*RMS*). Полученный уровень действующего значения фазного напряжения после применения фильтра низких частот первого порядка (*Low pass*

filter), постоянная времени которого много меньше электромагнитной постоянной времени АМ с КЗ ротором, поступает на вход системы автоматического управления для формирования управляющих воздействий.

Основным параметром системы автоматического управления, требующим подбора и определяющим

быстроту реакции системы на возмущающее воздействие, а именно изменение питаемой генераторной установкой нагрузки, является период дискретизации. Результаты имитационного моделирования генераторной установки при задании различного периода дискретизации САУ в различных режимах работы представлены на рис. 6.

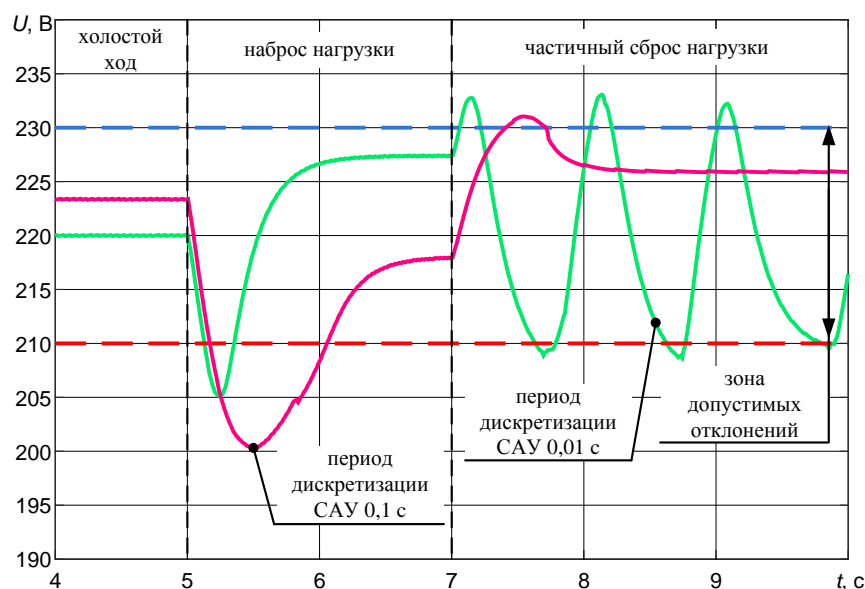


Рис. 6. Временные диаграммы фазного напряжения генераторной установки в различных режимах работы при варьировании периода дискретизации системы автоматического управления

Fig. 6. Timing diagrams of the phase voltage of the generator bench in various operating modes with varying sampling period of the automatic control system

Задание периода дискретизации САУ, организующей управление коммутируемыми конденсаторными батареями (рис. 2), равного 0,1 с, обеспечивает стабилизацию напряжения (рис. 6) генераторной установки в режимах холостого хода, наброса и частичного сброса подключаемой активной симметричной нагрузки в зоне допустимых отклонений. Задание периода дискретизации САУ, равного 0,01 с, обеспечивает более высокую скорость реакции на изменение питаемой нагрузки, однако приводит к избыточной колебательности контролируемого напряжения.

Полученные в результате моделирования при задании периода дискретизации САУ 0,1 с итоговые графики фазного напряжения генераторной установки (рис. 7, б) и суммарной емкости (рис. 7, а) одной из конденсаторных батарей без учета емкости базового конденсатора представлены ниже.

Модель генераторной установки демонстрирует успешную стабилизацию фазного напряжения (рис. 7, б), отклонение которого не превышает 20 В относительно номинальных 220 В, при набросе и сбросе полной активной симметричной нагрузки мощностью 2 кВт. При этом заданный период дискретизации САУ и выбранные уставки зоны допустимых отклонений, обеспечивающей релейную регулировочную характеристику, позволяют уменьшать число коммутаций тиристорных ключей при регулировании суммарной емкости конденсаторной батареи, снижая нагрузку на силовую часть устройства.

Исследование процесса стабилизации напряжения генераторной установки на экспериментальной установке

Натурные испытания системы стабилизации напряжения производились на макете генераторной установки на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением (рис. 8).

В качестве генератора применялась АМ с КЗ ротором АДМ100Л2 (рис. 8) номинальной мощностью 5,5 кВт с синхронной скоростью 3000 об/мин. Имитацию работы турбины генераторной установки осуществлял дизельный двигатель КМ186FAG, приводя в движение вал АМ, обеспечивая уровень угловой скорости, близкий к номинальному значению. В качестве резервного источника питания применялся аккумулятор. Каждая из трех конденсаторных батарей, соединенных треугольником (рис. 1), включала четыре коммутируемые конденсаторные стойки с номиналами 1, 2, 4 и 8 мкФ соответственно, а также базовый конденсатор емкостью 15 мкФ. Выбранное число ступеней обеспечило шаг регулирования суммарной емкости конденсаторной батареи, без учета емкости базового конденсатора, в 1 мкФ в диапазоне от 1 до 15 мкФ. В качестве тиристорного ключа, осуществляющего коммутацию в конденсаторных батареях, применялся SK45UT12 с номинальным током 45 А, номинальным напряжением для силового канала 1200 В. Блок коммутации (рис. 2) был реализован на основе оптопары МОС3082М с симисторным выходом. Система автоматического управления была реализована на основе микроконтроллера STM32F103C8T6.

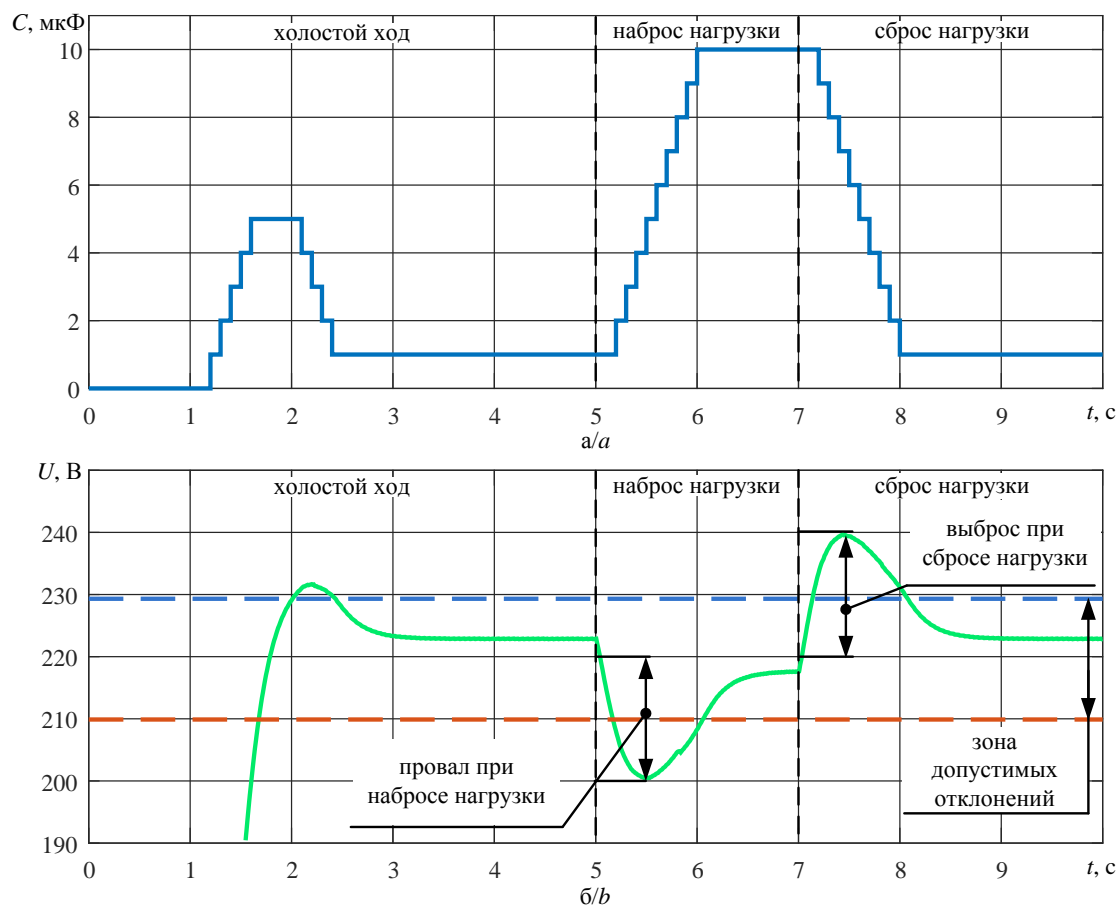


Рис. 7. Временные диаграммы регулируемой суммарной емкости конденсаторной батареи без учета емкости базового конденсатора (а) и стабилизируемого фазного напряжения (б) генераторной установки в различных режимах работы, полученные при моделировании

Fig. 7. Timing diagrams of the controlled total capacity of the capacitor bank without base capacity (a) and the stabilized phase voltage (b) of the generator bench in various operating modes after simulation

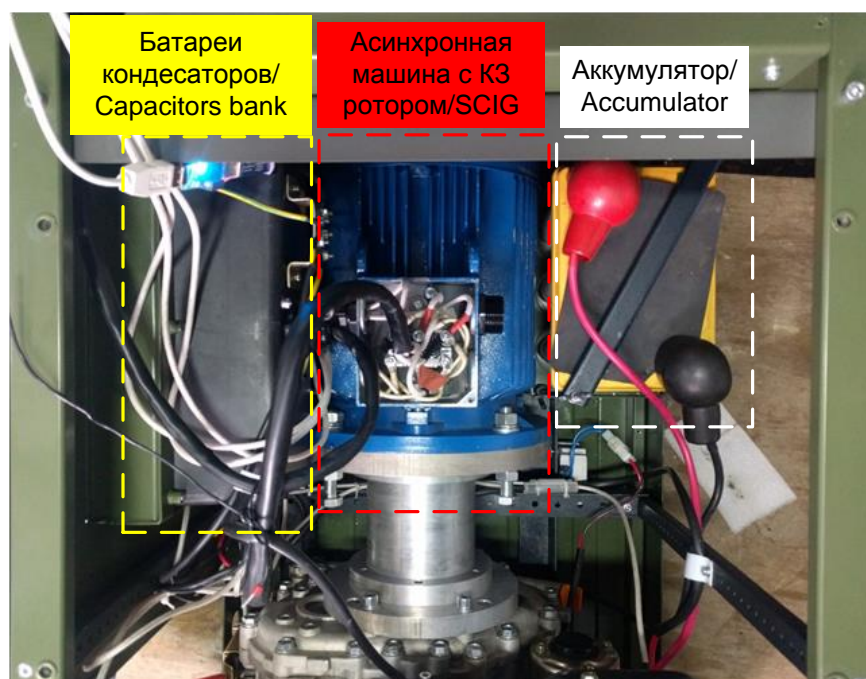


Рис. 8. Внешний вид макета генераторной установки на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением

Fig. 8. Photo of the squirrel-cage induction generator bench with non-stationary capacitor excitation

Для подтверждения возможности регулирования напряжения, генерируемого АМ с КЗ ротором, при различной мощности питаемой активной симметрич-

ной нагрузки были построены семейства вольт-фарадных и герц-фарадных регулировочных характеристик генераторной установки (рис. 9).

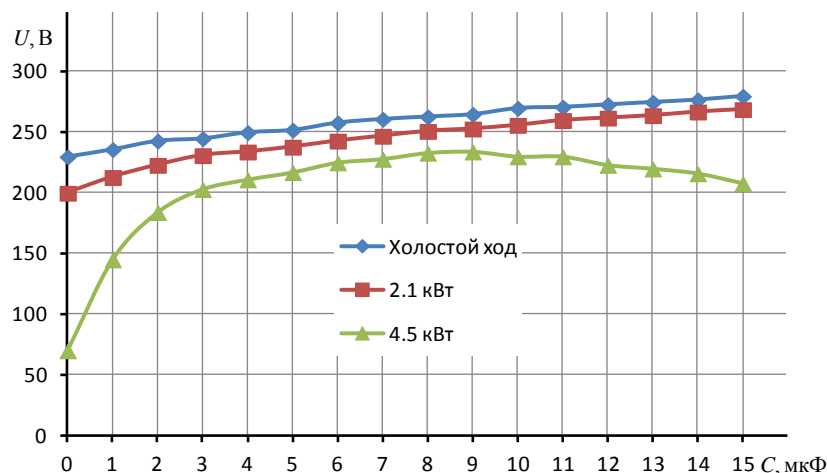


Рис. 9. Вольт-фарадные регулировочные характеристики при различной номинальной мощности питаемой активной симметричной нагрузки без учета емкости базового конденсатора

Fig. 9. Voltage-capacitance control characteristics at different rated power of the supplied active balanced load without base capacity

Вольт-фарадные регулировочные характеристики при работе на холостом ходу и на активную нагрузку с номинальным значением потребляемой мощности 2,1 кВт имеют практически линейный характер, что позволяет реализовать систему стабилизации фазного напряжения (рис. 4), малочувствительную к изменению нагрузки в диапазоне 0...2,1 кВт. При работе на нагрузку с номинальным значением потребляемой мощности 4,5 кВт в диапазоне дополнительных регу-

лируемых емкостей от 0...3 мкФ наблюдается явная нелинейность характеристики, связанная с недовозбуждением, что объясняется тем, что АМ с КЗ ротором представляет собой сильно нелинейный объект в условиях значительной перегрузки. В диапазоне от 3...9 мкФ характеристика носит линейно нарастающий характер. В диапазоне от 10...15 мкФ наблюдается спадающий участок, объясняемый работой приводного дизельного двигателя в перегруженном режиме.

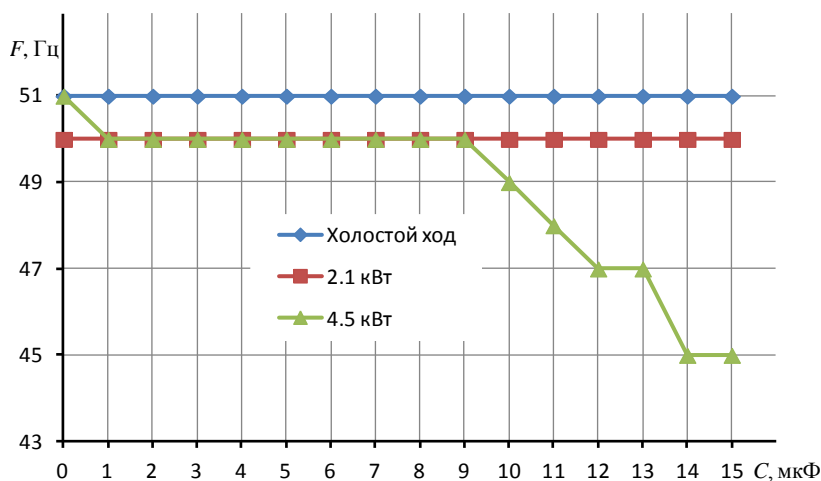


Рис. 10. Герц-фарадные регулировочные характеристики при различной мощности питаемой активной симметричной нагрузки

Fig. 10. Frequency-capacitance control characteristics at different power of the supplied active balanced load

Герц-фарадные регулировочные характеристики при работе на холостом ходу и на активную нагрузку с номинальным значением потребляемой мощности 2,1 кВт имеют практически линейный характер, демонстрируя отсутствие зависимости частоты переменного тока генератора от емкости конденсаторной батареи без учета базового конденсатора. В случае предельной

для данной установки мощности нагрузки с номинальным значением 4,5 кВт для диапазона емкостей 9...15 мкФ дополнительных коммутируемых конденсаторов наблюдается пропорциональное снижение частоты переменного тока генератора с 50 до 45 Гц. Этот эффект объясняется тем, что данный генератор является источником ограниченной мощности.

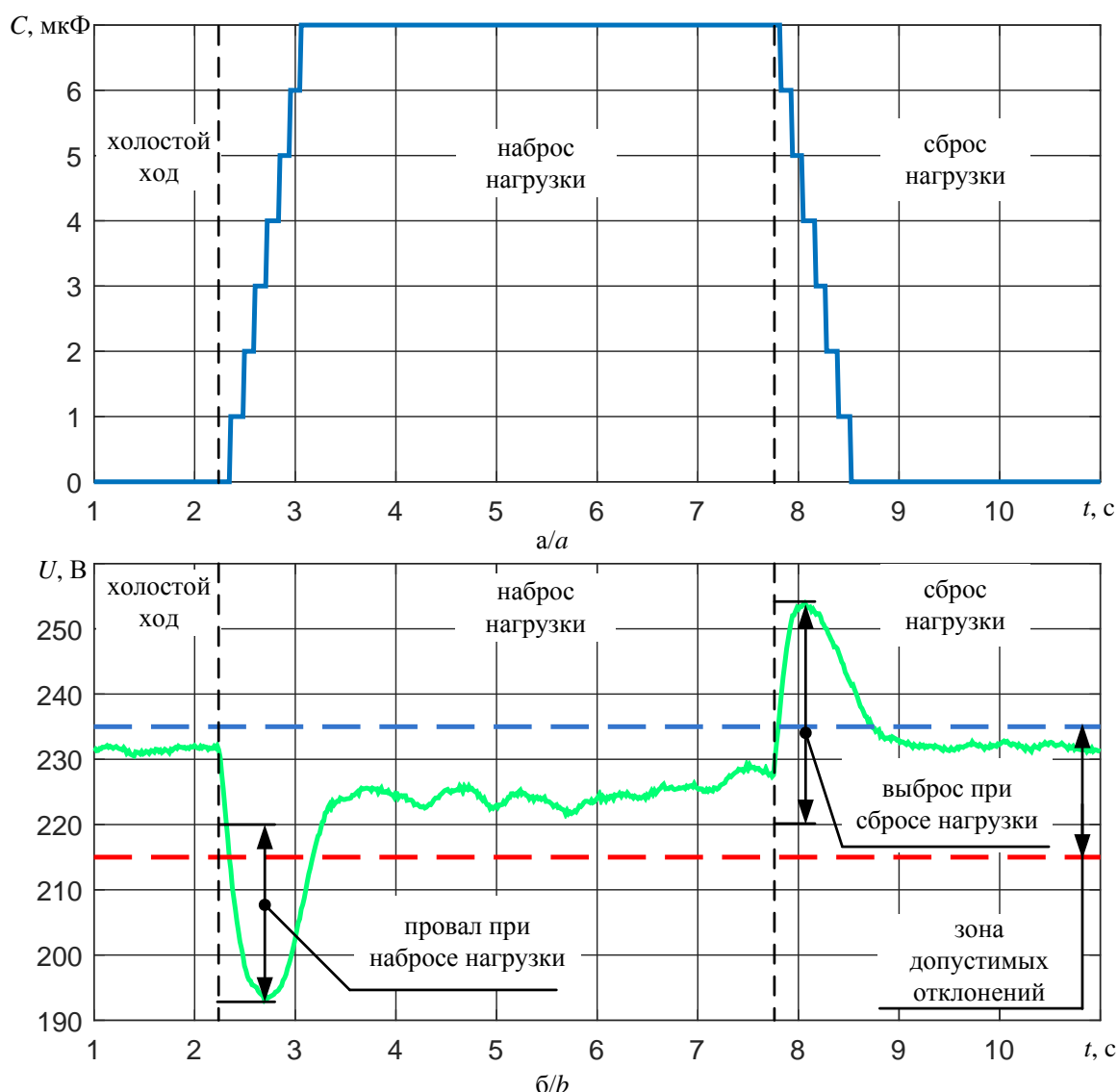


Рис. 11. Временные диаграммы регулируемой суммарной емкости конденсаторной батареи (а) и стабилизируемого фазного напряжения (б) генераторной установки в различных режимах работы, полученные в результате эксперимента

Fig. 11. Timing diagrams of the controlled total capacity of the capacitor bank (a) and the stabilized phase voltage (b) of the generator bench in various operating modes after the experiment

Результаты тестирования алгоритма управления возбуждением генераторной установки, синтезированного на основе имитационной модели (рис. 4–7) и реализованного в программном обеспечении микроконтроллера, представлены на рис. 11, а, б.

Система, изначально запущенная на холостом ходу, имела напряжение близкое к 220 В (рис. 11, а, б). При этом зона допустимых отклонений напряжения была задана 220 ± 15 В, а период дискретизации САУ равнялся 0,1 с. На второй секунде была подключена активная нагрузка номинальной мощностью 2,1 кВт, что вызвало динамический провал напряжения не более 20 % с последующей стабилизацией напряжения в течение не более одной секунды, при этом статическая ошибка составляла не более 10 В. После сброса нагрузки динамический выброс напряжения не превысил 20 % с последующей стабилизацией в течение не более одной секунды.

Заключение

Анализ экспериментальных зависимостей переходных процессов выходного напряжения генератора с нестационарным конденсаторным возбуждением доказывает работоспособность предложенного метода стабилизации напряжения АМ с КЗ ротором.

Показатели качества электроэнергии, вырабатываемой генераторной установкой на базе АМ с КЗ ротором с нестационарным конденсаторным возбуждением, соответствуют требованиям ГОСТ Р 56124.2-2014 «Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации» при работе на симметричную активную нагрузку, что делает возможным ее применение в составе ВЭУ и микро-ГЭС.

Дальнейшим развитием проведенных исследований может стать анализ поведения представленной системы при работе на другие типы нагрузок, в том числе несимметричные и нелинейные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безруких П.П., Безруких П.П. мл. Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов. – М.: Институт устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации/Центр экологической политики России, 2011. – 74 с.
2. Власов В.К. Ветро двигатели. Теория и практика. – М.: РИЦ «Техносфера», 2020. – 227 с.
3. Papera L.M. Microhydro power plant future energy source. – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017. – 56 p.
4. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России. Справочник / М.И. Дворецкая, А.П. Жданова, О.Г. Лушников, И.В. Слива / под общей ред. к. т. н., проф. В.В. Берлина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. – 224 с.
5. Optimization potential analysis of micro-hydro power plant (MHPP) from river with low head / R. Marliansyah, D.N. Putri, A. Khootama, H. Hermansyah // Energy Procedia. – 2018. – V. 153. – P. 74–79.
6. Abolvafoei M., Ganjefar S. Maximum power extraction from fractional order doubly fed induction generator based wind turbines using homotopy singular perturbation method // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2020. – V. 119. – P. 1–17.
7. Dinh-Chung Phan, Yamamoto S. Rotor speed control of doubly fed induction generator wind turbines using adaptive maximum power point tracking // Energy. – 2016. – V. 111. – P. 377–388.
8. Tapia R., Medina A. Doubly-fed wind turbine generator control: a bond graph approach // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2015. – V. 53. – P. 149–166.
9. Николаев В.Г., Харченко В.В. Перспективы и проблемы развития в России ветродизельных энергетических комплексов // Энергетик. – 2016. – № 3. – С. 5–7.
10. Альтернативные источники: энергия ветра, плюсы и минусы // Энерго.Хаус. 2020. URL: <https://energo.house/veter/energiya-vetra.html> (дата обращения 20.11.2020).
11. Севастьянов В.В., Сапьян Е.С. Ветроэнергетические ресурсы центральных районов Республики Алтай // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 55–64.
12. Ощепкова Я.О., Киушкина В.Р. Кластерный анализ потенциала возобновляемых источников энергии в Республики Саха (Якутия) // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2014. – Т. 4. – № 23. – С. 1–19.
13. Киушкина В.Р. Повышение энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения регионов северных территорий и арктических зон (на примере Республики Саха (Якутия)): автореф. дис. ... д-р. техн. наук. – Красноярск, 2019. – 38 с.
14. Севастьянова Л.М., Никольченко Ю.Н. Потенциальные ветро- и гелиоэнергетические ресурсы в Алтайском Крае // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – № 365. – С. 187–193.
15. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. – М.: Минэнерго РФ, 2020. – 93 с.
16. Краснов В.Г., Касаткина Е.В., Калинина М.В. Экономическая целесообразность изысканий рациональных конструкций микро-ГЭС // Инновации и инвестиции. – 2019. – № 2. – С. 166–169.
17. Вершинина И.П. Оценка энергетического потенциала малых рек бассейна Томи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 3. – С. 111–118.
18. Авиллов В.Д., Серкова Л.Е. Малая гидроэнергетика и энергетическая стратегия Сибирского региона // Национальные приоритеты России. – 2009. – № 1. – С. 95–113.
19. Gil-González W., Montoya O.D., Garces A. Standard passivity-based control for multi-hydro-turbine governing systems with surge tank Author links open overlay // Applied Mathematical Modelling. – 2020. – V. 79. – P. 1–17.
20. Optimization for hydro-photovoltaic-wind power generation system based on modified version of multi-objective whale optimization algorithm / X. Yin, L. Cheng, X. Wang, J. Lu, H. Qin // Energy Procedia. – 2019. – V. 158. – P. 6208–6216.
21. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Способы повышения качества выходного напряжения микрогидроэлектростанции с тиристорным автобалластом // Промышленная энергетика. – 2000. – № 8. – С. 49–52.
22. Hossain Md.M., Ali Mohd.H. Future research directions for the wind turbine generator system // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – V. 49. – P. 481–489.
23. Волков А.Г. Многозонные электронные конвертеры для автономных систем генерирования электрической энергии: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2016. – 192 с.
24. Подход к построению адаптивного алгоритма экстремального регулирования мощности в системе солнечной энергетики / С.Г. Михальченко, В.А. Рускин, С.М. Семенов, И.П. Орлянский, S. Hala'sz // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 102–112.
25. ГОСТ Р 56124.2-2014. Гибридные электростанции на основе возобновляемых источников энергии, предназначенные для сельской электрификации. – М.: Стандартинформ, 2016. – 49 с.

Поступила 03.12.2020 г.

Информация об авторах

Буньков Д.С., инженер-программист, ООО «Элетим».

Глазырин А.С., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета; профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Боловин Е.В., кандидат технических наук, старший преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Крохта Ю.В., инженер-программист, ООО «Элетим».

Баннов Д.М., инженер кафедры электрических станций Электротехнического факультета Самарского государственного технического университета.

Ковалев В.З., доктор технических наук, профессор Института нефти и газа Югорского государственного университета.

Хамитов Р.Н., доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрической техники Омского государственного технического университета; профессор кафедры электроэнергетики Тюменского индустриального университета.

Кладиев С.Н., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ланграф С.В., кандидат технических наук, руководитель сектора разработки встроенного ПО, ООО «НПФ Мехатроника-Про».

Леонов А.П., кандидат технических наук, доцент отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 621.313.332

RESEARCH OF A SQUIRREL-CAGE INDUCTION GENERATOR FOR RENEWABLE ENERGY WITH NON-STATIONARY CAPACITOR EXCITATION

Dmitriy S. Bunkov¹,
bunkovds@tpu.ru

Alexander S. Glazyrin^{2,3},
asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy V. Bolovin²,
orange@tpu.ru

Yuriy V. Krokhta¹,
yuriy.krokhta@gmail.com

Dmitriy M. Bannov⁴,
bannov.dm@samgtu.ru

Vladimir Z. Kovalev³,
vz_kovalev@mail.ru

Rustam N. Khamitov^{5,6},
apple_27@mail.ru

Sergey N. Kladiev²,
kladiev@tpu.ru

Sergey V. Langraf⁷,
sergeylgrf@gmail.com

Andrey P. Leonov²,
leonov_ap@tpu.ru

¹ Eletim Ltd,
161A, Altayskaya street, Tomsk, 634021, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Yugra State University,
16, Chekhov street, Khanty-Mansiysk, 628012, Russia.

⁴ Samara State Technical University,
244, Molodogvardeyskaya street, Samara, 443100, Russia.

⁵ Omsk State Technical University,
11, Mira avenue, Omsk, 644050, Russia.

⁶ Tyumen Industrial University,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

⁷ NPF Mechatronica-Pro LTD,
119E, Frunze avenue, Tomsk, 634021, Russia.

The relevance. The share of electricity generated by installations based on renewable energy is constantly growing, and therefore the need for the development of power supply systems and automatic control of electrical machines underlying wind and hydro generators is still relevant. As part of such alternating current generator sets, synchronous electric machines, induction generator with phase and squirrel-cage rotor are used. Frequency converters installed in the stator and rotor circuits of induction generators make it possible to control their excitation, however, to start generation, additional external power sources must be used. Due to the residual magnetization in the magnetic circuit, it is possible to ensure the process of guaranteed self-excitation of the induction generator by connecting the capacitor banks to the electrical circuit of its stator without using an additional external power source. The proposed method of non-stationary capacitor excitation makes it possible to ensure the adaptation of the generator set to the change in operating modes under conditions of decentralized power supply.

The main aim of the research is to study the proposed voltage stabilization system of squirrel-cage induction generator with a short-circuit rotor with variable capacitor excitation as part of a renewable energy source.

Methods. To achieve the goal of the study, theoretical and experimental research methods were used. Theoretical research methods include the theory of differential equations, methods for the numerical solution of ordinary differential equations, the theory of electric drives, the theory of electrical machines, numerical methods for approximating data. The basis of experimental research is testing an induction generator with non-stationary capacitor excitation on a developed test bench in order to obtain load characteristics and oscillograms of voltages on the stator windings self-excitation of squirrel-cage induction generator rotor in different operating modes.

Results. An original experimental setup with a unit imitating the operation of a turbine, an electromechanical energy converter in the form of squirrel-cage induction generator with non-stationary capacitor excitation has been developed and manufactured. The control system is made in the form of a galvanically isolated module integrated with the power unit in a moisture-resistant design using a wireless Bluetooth communication interface. A method for switching capacitor banks using thyristors as a controlled switch with two-way conduction is described and tested. The analysis of the obtained load characteristics shows the fundamental possibility of ensuring a guaranteed generation of electricity with voltage stabilization within the limits of load power variation. The system of automatic switching of capacitors with a capacitance varying depending on the power consumption applied as part of the experimental setup made it possible to provide an acceptable time for dynamic response to a disturbing effect under nonstationary load.

Key words:

Renewable energy sources, induction generator, squirrel-cage rotor, non-stationary capacitor excitation, decentralized power supply.

REFERENCES

1. Bezrukih P.P., Bezrukih P.P. Jr. *Vetroenergetika. Vymysly i fakty. Osvety na 100 voprosov* [Wind power. Fiction and facts. Answers to 100 questions]. Moscow, Institute of Sustainable Development of the Public Chamber of the Russian Federation/Center environmental policy of Russia Publ., 2011. 74 p.
2. Vlasov V.K. *Vetrodvigateli. Teoria i praktika* [Wind turbines. Theory and practice]. Moscow, Tekhnosfera Publ. center, 2020. 227 p.
3. Papera L.M. *Microhydro power plant future energy source*. Saarbrücken, Germany, LAP LAMBERT Academic Publ., 2017. 56 p.
4. Dvortskeya M.I., Zhdanova A.P., Lushnikov O.G., Sliva I.V. *Vozobnovlyamaya energiya. Gidroelectostantsii Rossii. Spravochnik* [Renewable energy. Hydroelectric power plants of Russia. Directory]. St. Petersburg, Polytechnic university Publ., 2018. 224 p.
5. Marlansyah R., Putri D.N., Khootama A., Hermansyah H. Optimization potential analysis of micro-hydro power plant (MHPP) from river with low head. *Energy Procedia*, 2018, vol. 153, pp. 74–79.
6. Abolvafaei M., Ganjefar S. Maximum power extraction from fractional order doubly fed induction generator based wind turbines using homotopy singular perturbation method. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, vol. 119, pp. 1–17.
7. Dinh-Chung Phan, Yamamoto S. Rotor speed control of doubly fed induction generator wind turbines using adaptive maximum power point tracking. *Energy*, 2016, vol. 111, pp. 377–388.
8. Tapia R., Medina A. Doubly-fed wind turbine generator control: a bond graph approach *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2015, vol. 53, pp. 149–166.
9. Nikolaev V.G., Kharchenko V.V. Perspektivy i problemy razvitiya v Rossii vetrodizelnykh energeticheskikh kompleksov [Prospects and problems of development of wind-diesel power complexes in Russia]. *Energetik*, 2016, no. 3, pp. 5–7.
10. Alternativnye istochniki: energiya vetra, plyusy i minusy [Alternative sources: wind energy, pros and cons]. *Energo.Khaus*. 2020. Available at: <https://energo.house/veter/energiya-vetra.html> (accessed 20 November 2020).
11. Sevastyanov V.V., Sapian E.S. Windpower resources of central regions of the Altai Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 55–64. In Rus.
12. Oshchepkova Ya.O., Kiushkina V.R. Klasterny analiz potentsiala vozobnovlyayemykh istochnikov energii v Respubliki Sakha (Yakutiya) [Cluster analysis of the potential of renewable energy sources in the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Online magazine «Science»*, 2014, vol. 4, no. 23, pp. 1–19.
13. Kiushkina V.R. *Povyshenie energeticheskoy bezopasnosti detsentralizovannykh zon elektroobrazovaniya regionov severnykh territoriy i arkticheskikh zon (na primere Respubliki Sakha (Yakutiya))*. Avtoreferat Dis. Dokt. nauk [Improving the energy security of decentralized power supply zones in the regions of the northern territories and arctic zones (on the example of the Republic of Sakha (Yakutia))]. Dr. Diss. Abstract]. Krasnoyarsk, 2019. 38 p.
14. Sevastyanova L.M., Nikolchenko Yu.N. Potentsialnye vetro- i gelioenergeticheskie resursy v altayskom krae [Potential wind and solar energy resources in the Altai Territory]. *Tomsk State University Journal*, 2012, no. 365, pp.187–193.
15. *Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda* [Energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035]. Moscow, Ministry of energy of Russian Federation, 2020. 93 p.
16. Krasnov V.G., Kasatkina E.V., Kalinina M.V. Ekonomicheskaya tselesoobraznost izyskaniy ratsionalnykh konstruktivnykh mikro-GES [Economic feasibility of researching rational structures of micro-hydroelectric power plants]. *Innovation and investment*, 2019, no. 2, pp. 166–169.
17. Vershinina I.P. Evaluation of energy potential of small rivers of the Tom. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 3, pp. 111–118. In Rus.
18. Avilov V.D., Serkova L.E. Malaya gidroenergetika i energeticheskaya strategiya Sibirskogo regiona [Small hydropower and energy strategy of the Siberian region]. *Russia's national priorities*, 2009, no. 1, pp. 95–113.
19. Gil-González W., Montoya O.D., Garces A. Standard passivity-based control for multi-hydro-turbine governing systems with surge tank Author links open overlay. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, vol. 79, pp. 1–17.
20. Yin X., Cheng L., Wang X., Lu J., Qin H. Optimization for hydro-photovoltaic-wind power generation system based on modified version of multi-objective whale optimization algorithm. *Energy Procedia*, 2019, vol. 158, pp. 6208–6216.
21. Lukutin B.V., Obukhov S.G., Shandarova E.B. Sposoby povysheniya kachestva vykhodnogo napryazheniya mikrohidroelectostantsii s tiristornym avtoballastom [Ways to improve the quality of the output voltage of a microhydroelectric power plant with a thyristor autballast]. *Industrial power engineering*, 2000, no. 8, pp. 49–52.
22. Hossain Md.M., Ali Mohd.H. Future research directions for the wind turbine generator system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, pp. 481–489.
23. Volkov A.G. *Mnogozonnyye elektronnyye konvertory dlya avtonomnykh sistem generirovaniya elektricheskoy energii*. Dis. Kand. nauk [Multi-zone electronic converters for autonomous power generation systems. Cand. Diss.]. Novosibirsk, 2016. 192 p.
24. Mikhailchenko S.G., Russkin V.A., Semenov S.M., Orlyanskiy I.P., Hala'sz S. Construction of adaptive algorithm of power extreme control in solar energy system. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 3, pp. 102–112. In Rus.
25. GOST R 56124.2-2014. *Gibridnye electrostantsii na osnove vozobnovlyayemykh istochnikov energii, prednaznachennykh dlya selskoy mestnosti* [State Standard R 56124.2-2014. Renewable hybrid power plants for rural electrification]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 49 p.

Received: 3 December 2020.

Information about the authors

Dmitriy S. Bunkov, software engineer, Eletim Ltd.**Alexander S. Glazyrin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University; professor, Yuga State University.**Evgeniy V. Bolovin**, Cand. Sc, senior lecture, National Research Tomsk Polytechnic University.**Yuriy V. Krokhta**, software engineer, Eletim Ltd.**Dmitriy M. Bannov**, engineer, Samara State Technical University.**Vladimir Z. Kovalev**, Dr. Sc., professor, Yuga State University.**Rustam N. Khamitov**, Dr. Sc., professor, Omsk State Technical University; professor, Tyumen Industrial University.**Sergey N. Kladiev**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.**Sergey V. Langraf**, head of the embedded software development sector, NPF Mechatronica-Pro Ltd.**Andrey P. Leonov**, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

УДК [504.43+504.73].054: 547.912

НАКОПЛЕНИЕ БЕНЗ[А]ПИРЕНА В РАСТЕНИЯХ РАЗНЫХ ВИДОВ И ОРГАНОГЕННОМ ГОРИЗОНТЕ ПОЧВ СТЕПНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРИ ТЕХНОГЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

Сушкова Светлана Николаевна¹,
terra_rossa@mail.ru

Яковлева Евгения Вячеславовна²,
kaleeva@ib.komisc.ru

Минкина Татьяна Михайловна¹,
tminkina@mail.ru

Габов Дмитрий Николаевич²,
gabov@ib.komisc.ru

Антоненко Елена Михайловна¹,
antonenko1102@yandex.ru

Дудникова Тамара Сергеевна¹,
tyto98@yandex.ru

Барбашев Андрей Игоревич¹,
barbashev_andrei@mail.ru

Минникова Татьяна Владимировна¹,
loko261008@yandex.ru

Колесников Сергей Ильич¹,
kolesnikov@sfedu.ru

Раджпут Вишну Даял,
rajput.vishnu@gmail.com

¹ Южный федеральный университет,
Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1.

² Институт биологии Федерального исследовательского центра Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук,
Россия, 167982, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 28.

Актуальность. Несмотря на значительное количество работ по исследованию загрязнения объектов окружающей среды полиаренами, недостаточно сведений о накоплении полициклических ароматических углеводородов и, в частности, наиболее токсичного бенз[а]пирена разными видами травянистых растений, что обуславливает актуальность исследований в данном направлении. Проведено изучение распределения бенз[а]пирена по органам растений и органогенным горизонтам почв зоны воздействия Новочеркасской ГРЭС.

Цель: выявить закономерности накопления бенз[а]пирена в растениях разных видов и органогенном горизонте почв степных фитоценозов в зависимости от удаления от Новочеркасской ГРЭС.

Объекты. В зоне действия Новочеркасской ГРЭС был проведен отбор проб надземной и корневой частей растений и подстилающих их органогенных горизонтов почв на глубину 0–20 см. Для исследования на мониторинговых площадках нами были выбраны доминантные виды травянистых растений: амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), полынь австрийская (*Artemisia austriaca* Jack.), тысячелистник благородный (*Achillea nobilis* L.), цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski.). Также были исследованы злаковые культуры: овсяк (*Avena fatua*), пшеница (*Triticum aestivum* L.), овес (*Avena sativa* L.), овсяница валлиская, или типчак (*Festuca valesiaca* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* L.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.).

Методы. Содержание бенз[а]пирена в образцах растений определяли модифицированным методом омыления. Модификация предполагает замену трехразовой экстракции этоксизтаном, являющимся прекурсором, на н-гексан. Извлечение поллютанта растворителем проводили после удаления мешающих липидных макрокомпонентов растений, предварительно подвергая кипячению образец в 2-% растворе гидроксида калия. Определение концентрации бенз[а]пирена осуществляли на хроматографе Agilent 1260 с флуориметрическим детектором.

Результаты. На основании кластерного анализа выявлены три группы травянистых растений по уровню содержания бенз[а]пирена: слабого, среднего и активного накопления. Максимальные уровни накопления бенз[а]пирена выявлены для типчака, минимальные для амброзии. Установлено, что массовая доля бенз[а]пирена в почвах и растениях закономерно снижалась по мере удаления от предприятия. Максимальное загрязнение было выявлено по трансекте генерального направления, в 1,6 км от источника. Наименее загрязненными были площадки, заложенные в восточном направлении. Исследование накопления бенз[а]пирена в разных органах растений показало, что наибольшим загрязнением отличались корни всех исследованных видов. Массовая доля бенз[а]пирена в органогенном горизонте почв значительно превышала его содержание в растениях разных видов.

Ключевые слова:

Бенз[а]пирен, сжигание угля, травянистые растения, почва, биоаккумуляция, техногенное загрязнение.

Введение

Химическое загрязнение почв чаще всего образуется за счет попадания смеси веществ в неорганической и органической формах на поверхность почвенных объектов. Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) являются органическими загрязнителями и побочными продуктами многих отраслей промышленности. К природным источникам ПАУ относят горные породы и минералы, природные лес-

ные и степные пожары, нефть и нефтепродукты, вулканическую деятельность [1]. Антропогенными источниками ПАУ в окружающей среде являются предприятия теплоэнергетического комплекса и работа автомобильного транспорта, добыча и переработка полезных ископаемых [2–4]. Основным вклад в загрязнение окружающей среды ПАУ вносит работа и функционирование предприятий теплоэнергетического комплекса. В процессе сжигания угля с выбросами

в воздух попадают не только тяжелые металлы, но и ПАУ. Распространение ПАУ в объектах наземных экосистем обусловлено рядом факторов, таких как летучесть, коэффициент разбавления [5]. Низкомолекулярные ПАУ, имеющие 2 или 3 бензольных кольца, больше склонны в абиотической диссипации или улетучиванию, чем ПАУ с высокой молекулярной массой (4–6 бензольных колец). Однако такие ПАУ имеют низкую растворимость и высокую степень абсорбции на поверхности [6, 7]. Установлено образование техногенных ореолов различной плотности при скоплении углеводородов, образующихся на промышленных предприятиях, с распространением ПАУ за пределы санитарно-защитной зоны предприятия [8, 9]. Е.Ю. Константиновой с соавторами при изучении селитебной зоны, зоны влияния Антипинского нефтеперерабатывающего завода и ТЭЦ-2 (г. Тюмень) обнаружено наибольшее содержание нафталина, флуорена, фенантрена, антрацена, флуорантена, пирена, бенз[а]антрацена, бенз[h]флуорантена, бенз[к]флуорантена, бенз[а]пирена, дибенз[а,h]антрацена, бенз[ghi]перилена в поверхностных горизонтах почв импактных зон [10].

Среди всех ПАУ, попадающих или находящихся в наземных экосистемах, наибольшую токсичность оказывает бенз[а]пирен (БаП) [11–13]. БаП в почве оказывает токсическое воздействие на состояние и функционирование наземных экосистем. Чувствительность флоры к ПАУ зависит от видовых особенностей самих растений, а также интенсивности влияния промышленности на окружающую среду. В настоящее время при мониторинговых исследованиях загрязнения биоценозов ПАУ чаще всего используют сообщества мхов и лишайников, так как представители их видов имеют высокий биоаккумуляционный потенциал к накоплению ПАУ [14–19]. Исследования Л.И. Белых с использованием расчета коэффициента биологического поглощения-удержания позволили разграничить растения на группы согласно их способности накапливать БаП из почвы [20]. Группу со слабой способностью биоаккумуляции составили представители корнеклубнеплодов; группу с повышенной способностью к биоаккумуляции – зерновые культуры.

При оценке канцерогенной опасности, связанной с накоплением ПАУ в сельскохозяйственной продукции, выращиваемой вблизи промышленных зон, было установлено, что наиболее опасны овощи, надземные части которых используются в пищу, т. к. надземная часть испытывает прямое техногенное воздействие от предприятий, где ПАУ попадают на поверхность листьев или стеблей по пути выбросов «атмосфера-растение» [21]. Однако в работе J. Feng et al. [22] при мониторинге сельскохозяйственных угодий, в которых основным источником содержания ПАУ в почве является сжигание соломы после уборки урожая, показано, что суммарное содержание ПАУ в пшенице уменьшается от корня к стеблю. При этом суммарное содержание ПАУ снижается по мере роста пшеницы от зоны перехода корня в стебель и в зоне перехода стебля в колос. Похожие результаты описаны в ис-

следованиях K. Tian et al. [23]. Как сообщает автор, суммарное содержание ПАУ в пшенице снижается от корня к стеблю, где частично содержание высокомолекулярных ПАУ в надземной части обусловлено аэротехногенным загрязнением. Объяснить это можно тем, что поглощение из воды и почвы через корни растений является основным путем проникновения ПАУ в растения, поэтому они больше адсорбируются на поверхности корней, а затем переходят в клеточные стенки соседних клеток, накапливаются в них и далее переходят и накапливаются в вакуолях. Высокомолекулярные ПАУ представляют большую угрозу для здоровья людей [24]. Как показывает ряд исследований, колос пшеницы имеет низкий биоконцентрационный отклик на загрязнение почв ПАУ и неблагоприятной обстановкой для этих культур является загрязнение приземного слоя воздуха [23, 25, 26]. Адсорбция ПАУ надземной частью растений зависит от морфологических и физиологических характеристик листьев. Особенности физиологического строения растений зависят от природно-климатических условий произрастания.

В степных регионах юга России, таких как Ростовская область, широко распространены травянистые растения. В том числе ареалы произрастания степных травянистых растений зачастую расположены в санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения практически всех предприятий теплоэнергетического комплекса Ростовской области [27, 28]. Существует ряд работ, посвященных исследованию воздействия промышленности на изменение состава почв и травянистых растений в районах воздействия предприятий теплоэнергетического комплекса [12, 20]. Так, изучен качественный и количественный состав органических загрязнителей почвы и растений промышленной зоны Тайшетского шпалопропиточного завода. Результаты свидетельствуют, что наибольшим накоплением ПАУ отличается вегетационная и корневая масса травянистых растений, по сравнению с корой и стволом деревьев широколиственных пород [28]. В работе Q. Yang et al. [29] отмечалось, что в многолетних травах суммарное содержание 16 ПАУ выше, чем в однолетних, а в целом суммарное содержание ПАУ в травянистой и кустарниковой растительности выше, чем в древесных культурах. Исследования воздействия угольных шахт на содержание ПАУ в растениях южной тундры позволили выявить, что травянистые растения, благодаря своей высокой аккумулятивной способности, вносят значительный вклад (около 10 %) в накопление ПАУ в тундровых фитоценозах [30, 31]. Важное влияние на накопление ПАУ оказывают видовые и биоморфологические особенности растений [31]. Обнаружена способность листьев *Tilia euchlora* к высокой степени биоаккумуляции бенз[а]пирена, по сравнению с листьями *Pyrus calleryana* [32]. Работы, посвященные исследованию концентраций ПАУ в листьях *Quercus ilex*, а также эпифитном мхе *Leptodon smithii*, характерных для городского агроценоза, показали, что максимальной биоаккумуляционной способностью обладают листья дуба, имеющие мощную восковую кутикулу, которые активнее аккумулирова-

ли ПАУ, по сравнению со мхом. Однако низко- и высокомолекулярные ПАУ накапливались во мхах, произрастающих в условиях урбанизированных городских территорий [33]. В результате изучения биоаккумуляции ПАУ вегетативной массой кизила (*Cornus mas*), клена (*Acer pseudoplatanus*) и лещины обыкновенной (*Corylus avellana*) установлено, что листья лещины отличались более высоким коэффициентом поглощения–удержания, а кленовые листья позволили отнести растения вида листопадных деревянистых кустарников и деревьев рода Лещина (*Corylus*) семейства Берёзовые (*Betulaceae*) к наиболее важным видам при оценке коэффициента поглощения–удержания ПАУ листовым покровом лесов, за счет высокого показателя индекса площади листа [34].

Зональными типами растительности Ростовской области являются разнотравно-дерновиннозлаковые, бедноразнотравно-дерновиннозлаковые, а также полынно-дерновиннозлаковые степи [35, 36]. Ростовская область является регионом с развитой сельскохозяйственной отраслью, в структуре земельного фонда которой доля распаханых земель составляет 87 %, земель поселений – 4 %, земель промышленности – 0,9 %, а земель, особо охраняемых природных территорий, – 0,1 % [37]. Несмотря на то, что земли промышленности занимают менее 1 % общей площади региона, на территории области расположено несколько крупных предприятий, в том числе Новочеркасская ГРЭС, что может оказывать негативное влияние на многочисленные участки с естественной растительностью и представлять угрозу для возделывания сельскохозяйственных культур. Элементы-примеси каменного угля, используемого в качестве основного топлива на предприятии, обогащены значительными количествами ПАУ. В селитебной зоне Новочеркасской ГРЭС расположено несколько населенных пунктов и водных объектов (рис. 1). Несмотря на значительное количество работ по исследованию загрязнения объектов окружающей среды ПАУ, недостаточно сведений об их накоплении, и в частности наиболее токсичного БаП, разными видами травянистых растений. Так как деятельность Новочеркасской ГРЭС общепризнана основным источником ПАУ в атмосфере [38], исследования характера загрязнения почв и травянистых растений в зоне действия Новочеркасской ГРЭС, представляют значительный интерес. Ранее было исследовано влияние выбросов тяжелых металлов на травянистые растения селитебной и санитарной защитной зоны [39]. Важно оценить дальность распространения БаП от предприятия, выявить видовые особенности накопления БаП растениями, их зависимость от биоморфологических показателей.

Цель работы – исследовать закономерности накопления бенз[а]пирена в почвах и травянистых растениях степной зоны на разном расстоянии от Новочеркасской ГРЭС.

Материалы и методы

В 2014 г. в зоне действия Новочеркасской ГРЭС был проведен отбор проб наземной и корневой частей растений и подстилающих их органогенных го-

ризонтов почв на глубину 0–20 см. Пробы отбирали в трех повторностях. Точки отбора проб представлены на рис. 1. Для исследования на мониторинговых площадках нами были выбраны доминантные виды травянистых растений: амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), полынь австрийская (*Artemisia austriaca* Jack.), тысячелистник благородный (*Achillea nobilis* L.), цикорий обыкновенный (*Cichorium intybus* L.), пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare* L.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski.). Также были исследованы злаковые культуры: овсюг (*Avena fatua*), пшеница (*Triticum aestivum* L.), овес (*Avena sativa* L.), овсяница валлиская (*Festuca valesiaca* L.), тростник обыкновенный (*Phragmites australis* L.), мятлик луговой (*Poa retense* L.).

Исследуемая территория воздействия НЧГРЭС и наблюдения условно поделена на две зоны. Площадки мониторинга, расположенные в северо-западном направлении, на расстоянии до 20 км от НЧГРЭС, составляют генеральное направление (№ 4–5, 8–10). Генеральное направление отбора проб почвы и растений линейно пересекает селитебные зоны трех населенных пунктов: станица Кривянская, г. Новочеркасск, станица Грушевская. Вторая условная зона состоит из площадок мониторинга, расположенных вокруг предприятия на расстоянии до 3 км: площадки № 1, 2, 3, 6, 7, 11, 12.

В соответствии с преобладающим направлением и розой ветров на местности было установлено генеральное направление, расположенное по прямой линии максимального азального распределения выбросов НЧГРЭС, проходящей от источника загрязнения через г. Новочеркасск и станицы Кривянской. Образцы почв и растений отбирали ежегодно по линии генерального направления на мониторинговых площадках № 4, 5, 8, 9, 10. Дополнительно были отобраны пробы вокруг НЧГРЭС на площадках № 1, 2, 3, 6, 7, 11 и 12.

Для определения содержания БаП в пробах почв и растений использовали стандартный метод ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3.62-09 в модификации [40]. Отбор проб проведен согласно ГОСТ 27262-87 и ГОСТ 17.4.4.02.-83 [41, 42]. На первом этапе пробоподготовки почвы очищались от природных и техногенных включений. Растения предварительно сушили на воздухе и измельчались. Далее проводили омыление образца в 2 % спиртовом растворе гидроксида калия с дальнейшей экстракцией БаП неполярным растворителем. Экстракция проведена трехкратно. Растворитель этоксизтан, рекомендуемый в методике, был заменен на н-гексан, т. к. этоксизтан принадлежит к числу ядовитых и наркотических средств [43]. Далее экстракт БаП в н-гексане помещали в круглодонную колбу объемом 100 мл, и выпаривали содержимое на роторном испарителе при 42 °С. Осадок в колбе растворяли в 1 мл ацетонитрила.

Содержание БаП в растворе ацетонитрила определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Agilent 1260 не позднее суток с момента окончания экстракции БаП. Хроматограф Agilent 1260 оснащен флуориметрическим детектором, в качестве адсорбента используется сили-

кагель, в качестве жидкой фазы – ацетонитрил. Концентрацию БаП в экстракте находили, сравнивая полученный сигнал на хроматограмме экстракта со стандартным раствором БаП. Концентрацию рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{S \cdot C_0}{S_0},$$

где S – площадь пика на хроматограмме экстракта БаП; S_0 – площадь пика на хроматограмме стандартного раствора БаП; C – концентрация БаП в экстракте; C_0 – концентрация БаП в стандартном растворе

Кластерный анализ выполнен в программе Statistica 6 методом Варда. Сходство накопления БаП растениями разных видов оценивалось по Евклидовому расстоянию.

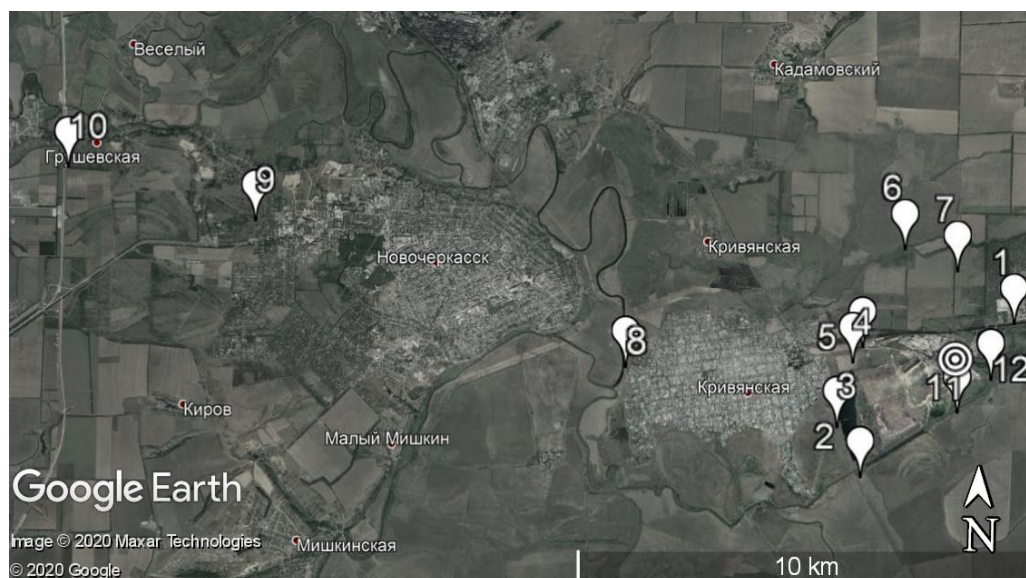


Рис. 1. Схема расположения мониторинговых площадок в зоне влияния Новочеркасской ГРЭС

Fig. 1. Map layout of monitoring sites in the zone of influence of Novocherkasskaya SDPS

Таблица 1. Расположение площадок и характеристика типа почв

Table 1. Location of sites and characteristics of the type of soil

№ площадки Site number	Координаты Coordinates	Удаленность от НЧГРЭС Distance from NcSDPS	Тип почв/Soil type
1	X – 40°15'035"; Y – 47°24'432"	1,0 км на северо-восток 1,0 km to the north east	Чернозем обыкновенный карбонатный среднесуглинистый малогумусный Chernozem ordinary carbonate medium-power low-humus heavy loamy loam
4	X – 40°12'245"; Y – 47°23'941"	1,6 км на северо-запад 1,6 km to the north-west	
5	X – 40°12'423"; Y – 47°24'129"	1,2 км на северо-запад 1,2 km to the north-west	
7	X – 40°13'088"; Y – 47°25'280"	1,5 км на север 1,5 km to the north	
9	X – 40°01'935"; Y – 47°25'595"	15 км на северо-запад 15 km to the north-west	
10	X – 40°01'935"; Y – 47°25'737"	20 км на северо-запад 20 km to the north west	
2	X – 40°12'418"; Y – 47°22'605"	3,0 км на юго-запад 3,0 km to the south west	Аллювиально-луговая карбонатная слабогумусированная песчаная на аллювиальных отложениях Alluvial meadow carbonate weakly humus sandy on alluvial deposits
3	X – 40°11'958"; Y – 47°23'231"	2,7 км на юго-запад 2,7 km to the south west	Лугово-черноземная пойменная малогумусная легкогоглинистая на аллювиальных отложениях Meadow-chernozemic floodplain low humus clayey on alluvial deposits
6	X – 40°13'116"; Y – 47°25'271"	2,0 км на северо-северо-запад 2,0 km to the north-north-west	Лугово-черноземная среднесуглинистая малогумусная тяжелосуглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chernozem medium-thick low-humus heavy loamy loess-like loams
8	X – 40°08'313"; Y – 47°23'842"	5 км на северо-запад 5 km to the north-west	Лугово-черноземная среднесуглинистая малогумусная тяжелосуглинистая на лессовидных суглинках Meadow-chernozem medium-thick low-humus heavy loamy loess-like loams
11	X – 47°38'959"; Y – 40°23'396"	1,0 км на юго-восток 1,0 km south east	Чернозем обыкновенный карбонатный среднесуглинистый слабогумусированный среднесуглинистый на лессовидных суглинках Ordinary black carbonate medium-power, slightly humus, medium-loamy, loamy loamy loam
12	X – 47°39'602"; Y – 40°24'456"	1,1 км на юг 1,1 km to the south	Аллювиально-луговая среднесуглинистая малогумусная среднесуглинистая на лессовидных суглинках Alluvial-meadow medium-power low-humus medium-loamy loamy loam

Результаты и обсуждение

Изменение содержания бенз[а]пирена в растениях. С целью определения сходства в накоплении БаП растениями разных видов был применен кластерный анализ (рис. 2). На основании полученных данных исследованные растения можно поделить на три группы по уровню накопления БаП: слабого, среднего и активного накопления. Для группы слабого накопления значения содержания БаП варьируют от 0,2 до 2,5 нг/г на разных мониторинговых площадках (табл. 2). К данной группе относятся растения семейства Астровые (*Asteraceae*): амброзия, пижма, тысячелистник и цикорий. У всех представленных видов сходное строение, плотные покрытые налетом листья, имеющие невысокую суммарную площадь поверхности, стебли с небольшой площадью, крупные одре-

весневшие корни, проникающие в минеральные горизонты, что минимизирует способность БаП проникать внутрь растения.

К группе среднего поглощения можно отнести растения с уровнем накопления БаП от 0,6 (на более чистых участках) до 7,8 нг/г (на сильно загрязненных участках). Данная группа представлена злаковыми культурами (*Gramineae*): мятликом, овсом, овсягом, пшеницей и представителем семейства Астровые (*Asteraceae*) – полынью. Все злаковые виды характеризуются хорошо развитой мочковатой корневой системой, способствующей более активному накоплению поллютантов из почвы. У злаков тонкие мягкие листья, через устьица которых проникновение БаП не затруднено.

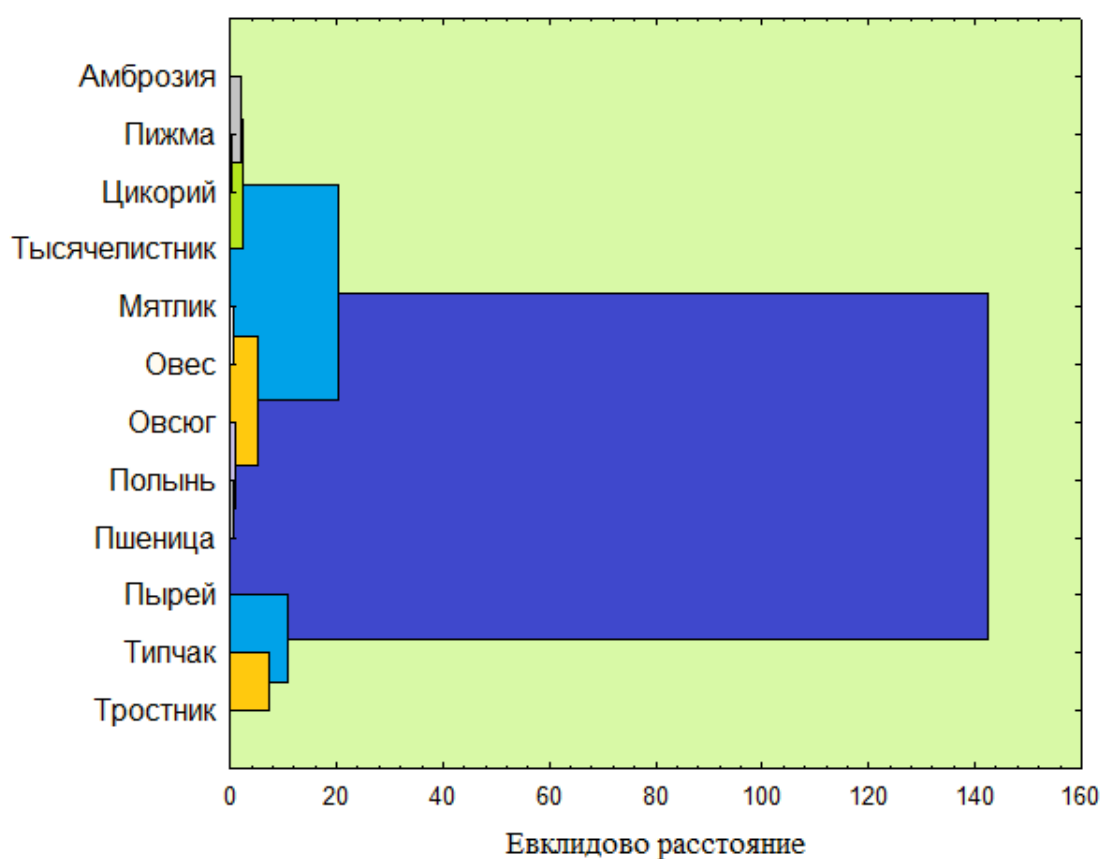


Рис. 2. Дендрограмма сходства в накоплении бенз[а]пирена растениями разных видов, метод Варда

Fig. 2. Dendrogram of similarities in accumulation of benzo[a]pyrene by plants of different species, Ward's method

У полыни корневая система стержневая, с мощным корнем и множеством боковых ответвлений, сконцентрированных в органогенном горизонте почвы. Но в сравнении с амброзией и пижмой из группы слабого накопления, ее листья и стебли обильно покрыты волосками, что играет важную роль в удержании БаП на поверхности листового аппарата.

Группа активного накопления сильно отличается по поглощению от двух остальных групп и представлена растениями многолетних злаковых культур: пыреем, типчаком и тростником. Пырей и типчак характеризуются повышенной площадью надземной по-

верхности и мощной мочковатой корневой системой, что объясняет их наивысшую способность к поглощению ПАУ. Тростник – довольно крупное и мощное растение со значительной площадью поверхности листьев, имеет мощное, толстое ползучее корневище и разветвленную корневую систему, что делает его активным аккумулятором БаП. Все виды изученной группы являлись многолетними растениями, что, вероятнее всего, может служить причиной высокого содержания в них БаП. Уровни содержания БаП в видах данной группы составили от 3,3 до 36,4 нг/г на разных мониторинговых площадках.

Таблица 2. Содержание бенз[а]пирена в растениях разных видов и в органогенном горизонте почв (0–20 см) на мониторинговых площадках в зоне действия Новочеркасской ГРЭС, нг/г

Table 2. Benzo[a]pyrene content in plants of different species and in organogenic soil horizon (0–20 cm) at monitoring sites in the area of operation of the Novocherkasskaya SDPS, $10^{-9} \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ soil

Вид растения Type of plant	Номер мониторинговой площадки/Monitoring site number											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Амброзия/Wormwood	0,40 0,11	0,20 0,08	0,20 0,07	1,30 0,45	0,60 0,19	0,30 0,09	0,20 0,09	0,50 0,15	0,20 0,07	0,30 0,11	0,20 0,08	0,50 0,18
Мятлик/Bluegrass	1,50 0,87	0,70 0,13	0,90 0,13	5,40 1,52	2,40 0,25	1,30 0,15	0,80 0,14	1,80 0,23	0,90 0,14	1,00 0,23	0,90 0,12	1,90 0,34
Овес/Oats	1,60 0,34	0,80 0,13	1,05 0,21	5,72 1,54	2,64 0,56	1,40 0,23	0,90 0,16	2,00 0,43	0,90 0,16	1,10 0,21	1,00 0,25	2,12 0,56
Овсян/Оatmeal	1,92 0,13	0,95 0,14	1,26 0,56	7,32 1,56	3,01 0,76	1,70 0,34	1,00 0,44	2,37 0,78	1,15 0,56	1,39 0,34	1,20 0,23	2,50 0,89
Пижма/Tansy	0,74 0,34	0,32 0,09	0,44 0,13	2,57 0,65	1,10 0,34	0,60 0,17	0,41 0,14	0,91 0,21	0,43 0,08	0,52 0,14	0,44 0,11	0,90 0,19
Полынь/Austrian wormwood	2,12 0,14	1,04 0,11	1,39 0,34	7,85 1,53	3,42 0,76	1,92 0,23	1,24 0,12	2,60 0,43	1,25 0,12	1,52 0,15	1,41 0,11	2,85 0,45
Пырей/Tuberculus	7,55 1,11	3,62 0,45	4,70 0,65	27,81 2,67	12,21 2,45	6,73 1,68	4,21 0,98	9,53 1,43	4,51 0,88	5,30 0,98	4,96 1,11	10,04 2,16
Пшеница/Wheat	2,22 0,78	1,11 0,34	1,44 0,56	7,13 1,56	3,64 0,98	2,05 0,68	1,25 0,23	2,80 0,78	1,31 0,34	1,62 0,45	1,53 0,33	3,03 0,98
Типчак/Fescue	9,85 1,56	4,74 0,87	6,20 1,67	36,43 2,45	16,00 2,18	8,73 1,15	5,54 1,11	12,4 2,13	5,82 1,11	6,93 1,98	6,44 1,13	13,12 2,45
Тростник/Reed	8,90 1,78	4,34 0,99	5,91 1,21	33,00 2,68	14,54 2,34	7,94 1,08	10,21 1,78	9,93 2,14	5,32 1,13	5,93 1,23	5,34 1,10	10,91 2,11
Тысячелистник/Yarrow	0,70 0,11	0,55 0,11	2,01 0,25	2,40 0,13	1,24 0,13	0,94 0,16	1,04 0,15	0,81 0,14	0,61 0,14	0,61 0,15	0,81 0,22	1,14 0,24
Цикорий/Chicory	0,63 0,12	0,31 0,11	0,44 0,13	2,43 0,25	1,13 0,36	0,61 0,15	0,74 0,15	0,73 0,23	0,41 0,13	0,41 0,13	0,44 0,12	0,80 0,14
Почва/Soil	49,44 15,57	30,92 11,36	31,22 10,78	205,03 21,47	113,74 12,66	48,15 12,90	34,08 14,61	59,03 16,81	91,43 20,70	69,40 19,64	57,30 19,45	74,52 16,52

Над чертой – среднее значение, под чертой – стандартное отклонение среднего.

Above the line is the average value, below the line is the standard deviation of the mean.

Исследование почв показало, что наибольшее накопление БаП характерно для образцов, отобранных на мониторинговой площадке № 4 (1,6 км к северо-западу от теплостанции) и на площадке № 5, находящейся севернее и ближе к источнику. Содержание БаП в растениях всех видов снижалось в 2 раза, возможно, это было связано с отклонением данной точки от основного потока переноса ПАУ. По площадке № 4, содержащей наибольшее количество БаП (205 нг/г), можно построить следующий ряд из изучаемых растений 3 групп накопления, нг/г: типчак (36,4) > тростник (33,0) > пырей (27,8) > полынь (7,8) > овсян (7,3) > пшеница (7,1) > овес (5,7) > мятлик (5,4) > пижма (2,6) > цикорий (2,43) > тысячелистник (2,4) > амброзия (1,3).

Помимо морфологического строения растений большую роль играет расстояние от источника БаП и сопутствующие источники загрязнения почв ПАУ, как автомагистрали вблизи площадок № 8–10. С удалением от источника загрязнения на площадке № 8 (5 км от НЧГРЭС по ведущему (генеральному) направлению розы ветров) происходило трехкратное снижение содержания БаП во всех растениях по сравнению с полученными данными на площадке № 4, находящейся на расстоянии 1,6 км от НЧГРЭС по ведущему (генеральному) направлению розы ветров. Такие же значения выявлены на площадке № 12 (1,1 км к югу от НЧГРЭС). В растениях мониторинговой площадки № 9 (15 км от НЧГРЭС) снижение содержания БаП достигало 5–6 раз по сравнению с

площадкой № 4 (1,6 км от НЧГРЭС по ведущему (генеральному) направлению розы ветров). С дальнейшим удалением на площадке № 10 (20 км от НЧГРЭС) не наблюдали снижения содержания БаП в растениях относительно 15 км расстояния, выявлен даже незначительный рост уровня накопления БаП в растениях (в 1,2 раза). Вероятнее всего, это связано с близким расположением площадки мониторинга к автомагистрали (350 м), соединяющей пос. Новоперсиановка со станцией Грушевской. Исследования в зоне действия Тайшерского ШПЗ позволили выявить закономерное снижение содержания ПАУ в почве и травомесели по мере удаления от источника и от автомобильных трасс. Отмечалось снижение содержания ПАУ в 5 раз по мере удаления от завода с 5 до 10 км, и в 20 раз с 5 до 15 км [14].

При рассмотрении площадок № 2 и 3, расположенных к юго-западу от Новочеркасской ГРЭС, было выявлено снижение содержания БаП в растениях по сравнению с максимальным уровнем загрязнения (площадка № 4) в 5–6 раз на площадке № 3 (2,7 км к юго-западу), более смещенной к западу, и в 6–7 раз на площадке № 2 (3 км к юго-западу), расположенной южнее. Подобный уровень загрязнения отмечен в точке № 11 (на 1 км северо-восточнее предприятия). Таким образом, загрязнение в этих точках было на уровне загрязнения в 15–20 км от Новочеркасской ГРЭС на линии генерального направления. Содержание БаП в растениях, отобранных на почве площадки мониторинга № 4 в 4 раза выше, чем в растениях,

отобранных с почв площадок № 1 (1 км северо-восток от источника) и № 6 (2 км на северо-запад). Поскольку растения данных площадок представлены одинаковыми видами, по сравнению с максимально загрязненной площадкой № 4, можно сделать вывод о том, что преимущественным фактором накопления БаП в растениях изученной территории является распределение выбросов Новочеркасской ГРЭС в зависимости от преобладающего направления розы ветров на местности.

Полученные данные позволяют подтвердить правильность выбора генерального направления перемещения органических загрязнителей от НчГРЭС по результатам кластерного анализа (рис. 3). Минимальное распространение БаП было характерно для восточного направления. Следует отметить, что для

всех исследуемых растений, кроме тысячелистника, представленные кратности превышения были очень близкими. Для тысячелистника они были ниже по сравнению с другими растениями для большинства исследуемых площадок, возможно, это связано с его низкой способностью к биоаккумуляции БаП, даже в условиях максимального загрязнения, с которым проводились сравнения.

Для пшеницы, овса и амброзии на мониторинговой площадке № 4 выявлены значительные превышения (до 12 раз) содержания БаП в корнях над соцветиями, это может быть связано с повышенным уровнем загрязнения на данной площадке. Здесь корневая система растений находится под воздействием сильного загрязнения почвы, как следствие накопления значительных количеств БаП.

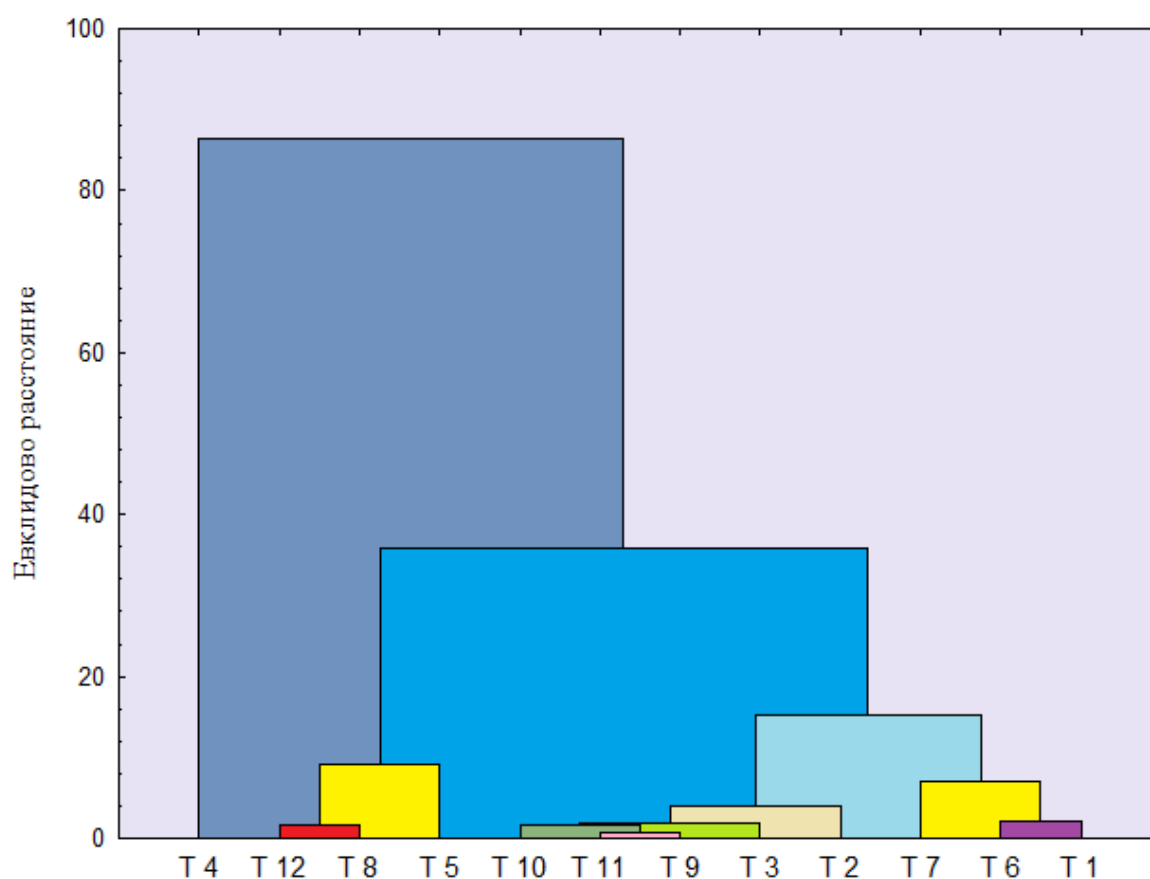


Рис. 3. Дендрограмма сходства в накоплении бенз[а]пирена растениями на разном удалении от Новочеркасской ГРЭС, метод Варда

Fig. 3. Dendrogram of similarities in accumulation of benzo[a]pyrene by plants at different distances from Novocherkasskaya SDPS, Ward's method

Однако содержание БаП в соцветиях мало отличается от значений на других мониторинговых площадках. Массовая доля БаП в органогенном горизонте почв была значительно выше содержания в растениях – от 137–423 раз для амброзии до 5–15 раз для типчака, на разных мониторинговых площадках. Наши предыдущие исследования травянистых растений в тундровой зоне подтверждают текущие результаты. В *Deschampsia caespitosa* и *Festuca ovina*, отобранных на фоновой почве, суммарное содержание

ПАУ ниже в 3–5 и 2–2,5 раз соответственно, чем у растений с загрязненных участков почвы [31].

На основании полученной дендрограммы можно констатировать, что содержание БаП в растениях всех видов сильно отличалось на мониторинговой площадке № 4, где происходило максимальное накопление БаП. В отдельный кластер объединялись площадки № 5, 8 (точки генерального направления) и 12 (1 км к югу от НчГРЭС), где загрязнение оставалось довольно высоким, но в 2–3 раза ниже, чем на пло-

щадке № 4. Точки со средним уровнем загрязнения площадки № 1, 6, 7, расположенные в 1–2 км к северу, северо-востоку от предприятия, также формировали отдельный кластер. В еще один кластер объединялись наиболее чистые участки, удаленные на 15–20 км по генеральному северо-западному направлению: площадки № 9 и 10 и площадки юго-западного № 2 и 3 (2–3 км от НчГРЭС) и северо-восточного направления № 11 (1 км от НчГРЭС). Из всех исследованных видов растений максимальные уровни накопления БаП выявлены для типчака, минимальные – для амброзии. Таким образом, следует отметить, что активность накопления ПАУ растениями во многом зависела от их биоморфологических характеристик: строения корневой системы, площади и формы листьев, размера растения и др.

Изменение содержания бенз[а]пирена в почве. Содержание ПАУ в верхнем слое почв площадок мониторинга меняется в зависимости от расположения и удаленности площадки от НчГРЭС. Содержание БаП в органогенных горизонтах почв (0–20 см) изменялось подобным образом, наименьшие уровни загрязнения были отмечены на мониторинговых площадках № 2, 3 и 7, с максимумом накопления в точке № 4. Содержание БаП в почвах площадки мониторинга № 4 в 2 раза выше, чем в почвах площадки мониторинга № 2, в 3 раза выше, чем в почвах площадок № 8, 12 и в 4 раза выше по сравнению с почвами площадок мониторинга № 1 и 6. Кратность полученных результатов относительно содержания БаП в почве площадки мониторинга № 4 к другим участкам зоны влияния предприятия соответствует кратности содержания БаП в растениях, произрастающих на тех же площадках мониторинга. Содержание БаП в почве площадки № 5 снижалось в 2 раза, на площадке № 8 и 12 установлено снижение в 3 раза, по сравнению с максимальным загрязнением. Массовая доля БаП в почве на мониторинговых площадках № 1 и 6 была в 4 раза ниже, чем в условиях наивысшего загрязнения на площадке № 4, что также совпадает с данными, полученными для растений.

При этом для почв характерны довольно высокие уровни загрязнения на площадках № 9 и 10, значительно удаленных от источника, содержание БаП в них снижается лишь в 2–3 раза по сравнению с расстоянием 1,6 км в северо-западном направлении. С учетом того, что на площадке № 8 в 5 км от НчГРЭС в этом же направлении отмечено трехкратное снижение содержания ПАУ в почвах, можно предположить, что на массовую долю БаП в почве значительное влияние оказывает близкое расположение автотранспортных магистралей. Для растений также наблюдали влияние выбросов автотранспорта на площадке № 10, в случае почв, находящихся под антропогенным воздействием более долгое время, по видимому, имеет место старое загрязнение, не отразившееся на растениях на участке № 9. Несмотря на то, что уровни загрязнения БаП почв площадок № 9 и 10 достаточно высокие, в том числе за счет автомагистралей, проходящей возле города Новочеркаска и станции Грушевской, интенсивность накопления БаП органами растений, в частности корневой системы,

была в 4–6 раз ниже, чем на площадке № 4. На площадке № 8 за станцией Кривянской, подверженной воздействию автотранспорта и выбросов НчГРЭС, накопление БаП корнями растений было выше, чем на площадках № 9 и 10, но ниже, чем на площадке № 4, в 3 раза.

Изменение накопления бенз[а]пирена озимой пшеницей и типчаком. Для оценки распределения БаП между органами растений проводили сравнение типичной сельскохозяйственной культуры региона – озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) [44], и сорного лугового растения – овсяницы валлисской, или типчака (*Festuca valesiaca* L.) (рис. 4, 5). Согласно табл. 2, озимая пшеница относится к растениям среднего накопления БаП, а типчак – к группе активного накопления БаП. В этой части исследования необходимо оценить распределение БаП по органам растений: корням, стеблям и соцветиям (колосу). Минимальное накопление БаП было характерно для колосьев пшеницы и соцветий типчака – 0,33–1,43 и 1,83–14,16 нг/г, что, возможно, связано в первую очередь со временем накопления поллютанта данными частями растений. Также вышеуказанные особенности накопления БаП могут быть связаны с физиологическим и морфологическим строением растений, периодом отбора и развития растений. Как следствие этих факторов зафиксирована меньшая аккумуляция выбросов Новочеркасской ГРЭС. Акропетальная направленность в накоплении БаП свидетельствует об активном поглощении ПАУ из почвы.

Кратности превышения содержания ПАУ в корнях над стеблями на большинстве площадок составляли 2–3 раза, в корнях над соцветиями – в 4–6 раз. Следует отметить, что на всех исследованных участках содержание БаП в 2 до 10 раз превысило ПДК для почвы (20 нг/г). При сравнении накопления БаП вегетативными органами пшеницы и типчака установлено максимальное накопление в корнях, побегах и соцветиях на участке № 4, а минимальное – № 2.

Накопление БаП органами озимой пшеницы имело отличный от типчака характер (рис. 4). Содержание БаП в колосьях варьировалось от 0,22 (площадка № 2) до 1,42 нг/г (площадка № 4). В наземной вегетативной части озимой пшеницы наблюдали похожую разницу между минимальным значением – 0,75 (площадка № 2), и максимальным – 3,6 нг/г (площадка № 4). При этом разница между минимальным и максимальным значениями для соцветий и вегетативной массы составила 4 и 5 раз, соответственно. Однако разница между максимальным и минимальным значением для корневой зоны была значительно больше – 8 раз. У типчака распределение для соцветий, стеблей и корней было одинаковым и составило 8 раз (рис. 5). Такое накопление БаП в большем количестве корневой системой пшеницы обусловлено коротким периодом вегетации (до 280 дней, включая зимний период) и потребностью в элементах питания. Однако вместе с питательными элементами в пшеницу из почвы поступал БаП. Разница между содержанием БаП в корнях, стеблях и соцветиях пшеницы и типчака составляет 4, 8 и 10 раз, соответственно.

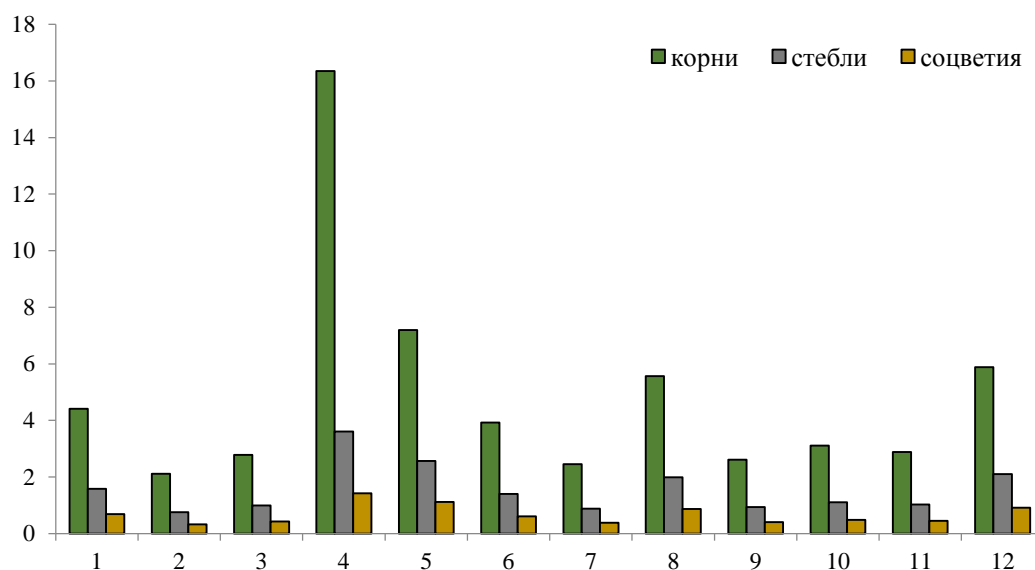


Рис. 4. Распределение бенз[а]пирена по органам пшеницы озимой (*Triticum aestivum* L.) на разных мониторинговых площадках Новочеркасской ГРЭС, нг/кг почвы

Fig. 4. Benz[a]pyrene distribution over winter wheat (*Triticum aestivum* L.) organs at different monitoring sites of Novocherkasskaya SDPS, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil

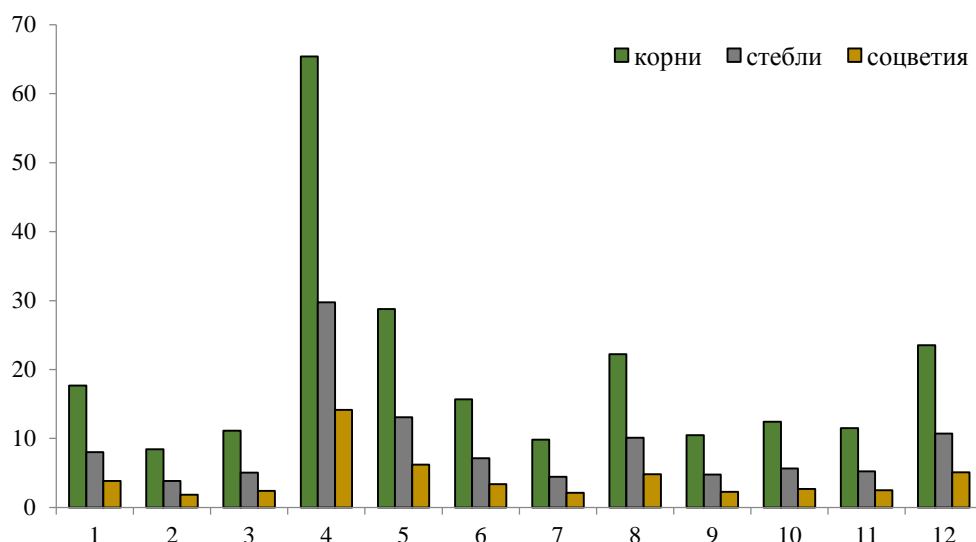


Рис. 5. Распределение бенз[а]пирена по органам типчака (*Festuca valesiaca* L.) на разных мониторинговых площадках Новочеркасской ГРЭС, нг/кг почвы

Fig. 5. Benz[a]pyrene distribution over fescue (*Festuca valesiaca* L.) organs at different monitoring sites of Novocherkasskaya SDPS, $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil

По данным табл. 2 максимальное содержание БаП в типчаке составило 36,4 нг/г, а в растениях озимой пшеницы содержание БаП установлено в 5 раз меньше (7,1 нг/г) по сравнению с типчаком обыкновенным. Индикация накопления БаП в почве и исследование аккумуляции выбросов на основании анализа данных двух видов растений, по накоплению БаП вегетативной массой и корневой системой, основано на широкой распространенности ареала произрастания данных видов, что делает их привлекательными для биомониторинга. Различия в накоплении БаП могут быть основаны на времени накопления токсиканта однолетними и многолетними растениями, поскольку БаП

слабо подвергается деструкции и крайне персистентен, что повышает его устойчивость и способность к накоплению многолетними растениями. Для однолетних растений, вероятнее всего, индикаторная роль к накоплению БаП за ограниченный период времени, т. е. за полный период вегетации, – от 4 до 6 месяцев.

Из всех площадок мониторинга, испытывающих воздействие автотранспорта, только на площадке № 8 содержание БаП в органах пшеницы и типчака отличалось от содержания на остальных полях. Как видно из рис. 4, содержание БаП в корневой системе озимой пшеницы было ниже, чем на площадке № 4, в 3 раза, но выше, чем на других площадках, в 2–3 раза.

Накопление в стебле и колосе типчака мало отличается от подобного накопления на других площадках за исключением площадки № 4. Для типчака на площадке № 8 наблюдали похожие тенденции к накоплению БаП в корневой системе растения. В стебле и соцветии типчака на площадке № 8 по сравнению с озимой пшеницей наблюдали большее содержание БаП, чем в пшенице площадок зоны наблюдения НчГРЭС за исключением площадок № 4 и 5.

Озимая пшеница – это наиболее популярная однолетняя зерновая культура в регионе. Полный период выращивания составляет более 200 дней, из которых на зимний период приходится порядка 120–150 суток, а на активную вегетацию от стадии кущения до созревания зерна – до 100 суток. Поскольку функционирование НчГРЭС осуществляется непрерывно, в том числе в течение зимы и начале весны, оседание и депонирование ПАУ и тяжелых металлов происходит аэральным путем как с поверхности почвы, так и при зимней аккумуляции в снежном покрове. Вероятно, именно этим и обусловлено высокое содержание БаП в корневой системе растения, по сравнению со стеблями и колосками, что также объясняется персистентностью данного соединения, имеющего особенность накапливаться в почве с годами. Период формирования стебля приходится на более ограниченный период, и переход поглощенного корнями БаП из корневой системы в стебель значительно ниже. Поглощение БаП поверхностью листового аппарата и колоса затруднено из-за микроскопического размера устьиц, препятствующих открытому проникновению пылеватых частиц сажи, содержащих БаП, напрямую в лист, благодаря физиологической структуре пшеницы [45]. Поэтому накопление БаП зерном озимой пшеницы затруднено, что обусловлено работой биохимических барьерных функций залковых.

Типчак, или овсяница валисская, является типичным многолетним пастбищно-кормовым растением степной зоны Ростовской области высотой до 50 см. Накопление БаП происходит равномерно по всем органам растения: разница между минимальными и максимальными значениями содержания БаП в корнях, побегах и соцветиях составляет 7 раз. Содержание БаП в стеблях и соцветиях выше, чем у озимой пшеницы, что связано с особенностями строения и более продолжительным периодом вегетации растения. Поскольку типчак является многолетним растением, накопление БаП происходит регулярно с равномерным распределением в вегетативных и репродуктивных органах растения. Использование типчака для выгула и выпаса животных в зоне максимального загрязнения (площадки № 4, 5) нежелательно.

Накопление корневой системой растений происходит в большей степени, чем наземной частью, как было показано ранее на яровом ячмене [46]. При этом полученные ранее данные о накоплении ПАУ в травянистых растениях тундровой зоны под действием предприятий угледобывающей промышленности согласуются с данными, согласно которым содержание БаП в овсянице овечьей (*Festuca ovina*) и щучке дернистой (*Deschampsia caespitosa*) превышало массо-

вую долю БаП в органогенном горизонте почв в 1,5–3 раза, соответственно [30]. Почвы тундр обедненные (тундровые поверхностно-глеевые), с толщиной органогенного горизонта до 5 см, в них органическое вещество может находиться в более доступных формах, что оказывает влияние на накопление мхами и лишайниками тяжелых и легких ПАУ [45, 47]. Во мхах *Pleurozium schreberi* в зоне влияния теплоэлектростанции г. Воркута происходило интенсивное накопление ПАУ, при этом только на поверхности мха концентрировалось до 20 % от всех ПАУ [48]. Такой факт может быть связан с влиянием типа почв: черноземы в степной зоне, вероятно, формируют комплексные соединения с ПАУ, делая их менее доступными для растений. Похожие результаты были получены ранее при моделировании загрязнения почв БаП при выращивании ярового ячменя [46]. С ростом концентрации БаП в почве все морфологические показатели ячменя были ингибированы. Изменение фитотоксичности почв было установлено для энергии прорастания, длины побегов и колоса, веса растений. При этом уровни поглощения БаП корнями ярового ячменя выше, чем в вегетативной части, более чем в 2,5 раза во всех загрязненных вариантах.

Выводы

1. На основании кластерного анализа выявлены три группы травянистых растений по уровню содержания бенз[а]пирена: слабого – амброзия, пижма, тысячелистник и цикорий; среднего – мятлик, овёс, овсюг, пшеница и полынь; активного накопления – пырей, типчак и тростник. Такое деление во многом объяснялось биоморфологическими особенностями растений. Из всех исследованных видов растений максимальные уровни накопления БаП выявлены для типчака, минимальные – для амброзии.
2. Массовая доля бенз[а]пирена в почвах и растениях закономерно снижалась по мере удаления от Новочеркасской ГРЭС. Максимальное загрязнение было выявлено по трансекте генерального направления, в 1,6 км от Новочеркасской ГРЭС. Наименее загрязненными были площадки, заложенные в восточном направлении.
3. Исследование накопления полиаренов в разных органах растений показало, что наибольшим загрязнением отличались корни всех исследованных видов. Минимальное накопление бенз[а]пирена было характерно для соцветий. Акропетальная направленность в накоплении бенз[а]пирена свидетельствует об активном поглощении полиаренов из почвы.
4. Массовая доля бенз[а]пирена в органогенном горизонте почв значительно превышала его содержание в растениях разных видов, что во многом могло быть связано с особенностями органогенного горизонта, в котором ПАУ могли находиться в связанном состоянии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-74-10046.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геохимия полициклических ароматических углеводородов в горных породах и почвах / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, В.Н. Флоровская, Т.А. Алексеева, И.С. Козин, А.И. Оглоблина, М.Е. Раменская, Т.А. Теплицкая, Е.И. Шурубор. – М.: Изд-во МГУ, 1996. – 196 с.
2. Ecotoxicological effects of traffic-related pollutants in roadside soils of Moscow / O. Nikolaeva, V. Tikhonov, M. Vecherskii, N. Kostina, A. Astaikina // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2019. – V. 17215. – P. 538–546.
3. Levels, temporal/spatial variations and sources of PAHs and PCBs in soil of a highly industrialized area / S. Yurdakul, I. Çelik M. Çelen, F. Öztürk, B. Cetin // *Atmospheric Pollution Research*. – 2019. – V. 10. – P. 1227–1238.
4. PAHs in urban soils of two Florida cities: Background concentrations, distribution, and sources / Yu. Liu, P. Gao, J. Su, E.B. da Silva, L.Q. Ma // *Chemosphere*. – 2019. – V. 214. – P. 220–227.
5. Cabrerizo A., Dachs J., Barceló D. Development of a soil fugacity sampler for determination of air–soil partitioning of persistent organic pollutants under field controlled conditions // *Environmental science & technology*. – 2009. – V. 43. – P. 8257–8263.
6. Biodegradation of mixed PAHs by PAH-degrading endophytic bacteria / X. Zhu, X. Ni, M. Waigi, J. Liu, K. Sun, Y. Gao // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2016. – V. 13 (8). – Article number 805.
7. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in a mixed contaminated soil supported by phytostabilisation, organic and inorganic soil additives / A. Wawra, W. Friesl-Hanl, M. Puschenreiter, G. Soja, Th., Reichenauer C. Roithner, A. Watzinger // *Science of the Total Environment*. – 2018. – V. 628. – P. 1287–1295.
8. Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils / J. Fismes, C. Perrin Ganier, P. Empereur Bissonnet, J.L. Morel // *Journal of Environmental Quality*. – 2002. – V. 31. – P. 1649–1656.
9. Галиудин Р.В., Башкин В.Н. Особенности поведения стойких органических загрязнителей в системе атмосферные выпадения–растение–почва // *Агрохимия*. – 1999. – № 12. – С. 69–77.
10. Полициклические ароматические углеводороды в почвах промышленных и селитебных зон Тюмени / Е.Ю. Константинова, С.Н. Сушкова, Т.М. Минкина, Е.М. Антоненко, А.О. Константинов, В.Ю. Хорошавин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2018. – Т. 329. – № 8. – С. 66–79.
11. Benzo[a]pyrene contamination in Rostov region of Russian Federation: a 10-year retrospective of soil monitoring under the effect of long-term technogenic pollution / S. Sushkova, T. Minkina, I. Turina, S. Mandzhieva, T. Bauer, I. Zamulina, R. Kizilkaya // *Eurasian J. Soil Sci.* – 2016. – V. 5 (2). – P. 155–165.
12. Bioaccumulation of benzo[a]pyrene nonextractable residues in soil by *Eisenia fetida* and associated background-level sublethal genotoxicity (DNA single-strand breaks) / A.C. Umeh, L. Panneerselvam, L. Duan, R. Naidu, K.T. Semple // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 69115. – P. 605–610.
13. Influence of bacterial community composition and soil factors on the fate of phenanthrene and benzo[a]pyrene in three contrasting farmland soils / Q. Zhu, Y. Wu, J. Zeng, X. Wang, X. Lin // *Environmental Pollution*. – 2019. – V. 247. – P. 229–237.
14. Doegowska S., Migaszewski Z.M. PAH concentrations in the moss species *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from the Kielce area (south-central Poland) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2011. – V. 74. – P. 1636–1644.
15. Wu Q., Wang X., Zhou Q. Biomonitoring persistent organic pollutants in the atmosphere with mosses: Performance and application // *Environment International*. – 2014. – V. 66. – P. 28–37.
16. Active biomonitoring of heavy metals and PAHs with mosses and lichens: a case study in the cities of Naples and London / S. Vingiani, F. de Nicola, W.O. Purvis, E. Concha-Grana, S. Muniategui-Lorenzo, P. Lopez-Mahia, S. Giordano, P. Adamo // *Water Air and Soil Pollution*. – 2015. – V. 226. – Article number 240.
17. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach / P. Iodice, P. Adamo, F. Capozzi, A. di Palma, A. Senatore, V. Spagnuolo, S. Giordano // *Science of the total environment*. – 2016. – V. 541. – P. 1410–1419.
18. Airborne petcoke dust is a major source of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Athabasca oil sands region / Y.F. Zhang, W. Shatyk, C. Zaccane, T. Noernberg, R. Pelletier, B. Bicalho, D.G. Froese, L. Davies, J.W. Martin // *Environmental Science & Technology*. – 2016. – V. 50. – P. 1711–1720.
19. Яковлева Е.В., Габова Д.Н., Безносиков В.А. Временные изменения содержания полиаренов в почвах и растениях нижнего яруса южной тундры под воздействием угледобывающей промышленности // *Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2017. – Т. 25. – № 2. – С. 271–293.
20. Белых Л.И. Полициклические ароматические углеводороды в природно-техногенных средах Южного Прибайкалья // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. – 2005. – № 6. – С. 539–551.
21. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: Sources, exposure, and cancer risk / J. Jia, C. Bi, J. Zhang, X. Jin, Z. Chen // *Environmental Pollution*. – 2018. – V. 241. – P. 750–758.
22. Distribution, transfer, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil-wheat systems of Henan Province, a typical agriculture province of China / J. Feng, X. Li, J. Zhao, J. Sun // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2017. – V. 24. – P. 18195–18203.
23. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China / K. Tian, H. Bao, X. Liu, F. Wu // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2018. – V. 25. – P. 23780–23790.
24. Application of quantitative structure-activity relationship (QSAR) model in comprehensive human health risk assessment of PAHs, and alkyl-, nitro-, carbonyl-, and hydroxyl-PAHs laden in urban road dust / G. Gbeddy, P. Egodawatta, A. Goonetilleke, G. Ayoko, L. Chen // *Journal of hazardous materials*. – 2020. – V. 383. – P. 121–154.
25. Khalil A., Al-Daoud A. Determination of gamma irradiation effects on polycyclic aromatic hydrocarbons content in wheat brans and endosperms using HPLC/FLT analysis // *Journal of Consumer Protection and Food Safety*. – 2018. – V. 13. – C. 407–412.
26. Emission characterization, environmental impact, and control measure of PM_{2.5} emitted from agricultural crop residue burning in China / H. Zhang, J. Hu, Y. Qi, C. Li, J. Chen, X. Wang, L. Zhang // *Journal of Cleaner Production*. – 2017. – V. 149. – P. 629–635.
27. Демина О.Н. Эколого-биоморфологический анализ степной ценофлоры бассейна Дона // *Юг России: экология, развитие*. – 2011. – № 1. – С. 31–40.
28. Маковская Т.И., Дьячкова С.Г. Органические загрязнители в почвенно-растительном покрове зоны влияния шпалопродукционного производства // *Вестник Крас ГАУ*. – 2009. – № 6. – С. 67–72.
29. PAHs accumulations in plant leaves around coal-fired power plant and identification of their potential use as bioindicators / Q. Yang, T. Luo, J. Yang, H. Chen // *Archives of environmental contamination and toxicology*. – 2019. – V. 76. – P. 346–355.
30. Полициклические ароматические углеводороды в почвах и растениях нижнего яруса южной кустарниковой тундры в условиях техногенеза / Е.В. Яковлева, Д.Н. Габова, В.А. Безносиков, Б.М. Кондратенко // *Почвоведение*. – 2014. – № 6. – С. 685–696.
31. Яковлева Е.В., Габова Д.Н., Безносиков В.А. Накопление полициклических ароматических углеводородов в растениях тундровой зоны при добыче угля открытым способом // *Вестник института биологии РАН*. – 2016. – № 4. – С. 24–33.
32. Солнцева М.П., Глазунова К.П. Влияние промышленного и транспортного загрязнения среды на репродукцию семенных растений // *Журнал общей биологии*. – 2010. – Т. 71. – № 2. – С. 163–175.
33. Improved biomonitoring of airborne contaminants by combined use of holm oak leaves and epiphytic moss / F. de Nicola, V. Spagnuolo, D. Baldantoni, L. Sessa, A. Alfani, R. Bargagli, F. Monaci, S. Terracciano, S. Giordano // *Chemosphere*. – 2013. – V. 92. – P. 1224–1230.

34. Towards more ecologically realistic scenarios of plant uptake modeling for chemicals: PAHs in a small forest / E. Terzaghi, G. Zacchello, M. Scacchi, G. Raspa, K.C. Jones, B. Cerabolini, A. di Guardo // *Science of the Total Environment*. – 2015. – V. 505. – P. 329–337.
35. Экологические проблемы города Каменска-Шахтинского / В.В. Приваленко, В.Т. Мазуренко, В.И. Панасков, Н.В. Мухин. – Ростов н/Д. Изд-во: ЗАО «Цветная печать», 2000. – 152 с.
36. Ермолаева О.Ю., Мясникова М.А. Флористические особенности залежных участков степей Ростовской области // *APRIORI*. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – № 3. – С. 1–17.
37. Курочкин В.Н. Анализ тенденций развития АПК Ростовской области // *Вестник аграрной науки Дона*. – 2014. – № 25. – С. 56–70.
38. Fly ash from coal combustion – An environmental source of organic compounds / J. Ribeiro, T.F. Silva, J.G. Mendonca Filho, D. Flores // *Applied Geochemistry*. – 2014. – V. 44. – P. 103–110.
39. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants / V. Chaplygin, T. Minkina, S. Mandzhieva, M. Burachevskaya, S. Sushkova, E. Antonenko, E. Poluektov, V. Kumacheva // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2018. – V. 190. – № 3. – Article number 124.
40. ПНД Ф 16.1.2.2. 2:3. 39-03. МВИ массовой доли бенз[а]пирена в пробах почв, грунтов, донных отложений и твердых отходов методом ВЭЖХ с использованием жидкостного хроматографа «Люмахром». М.: Изд-во «Люмэкс», 2003. – 27 с.
41. ГОСТ 27262-87. Корма растительного происхождения. Методы отбора проб, введ. 1988-07-01. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 9 с.
42. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – М.: Стандартинформ, 2018. – 9 с.
43. Об утверждении перечня наркотических средств, психотропных веществ и их прекурсоров, подлежащих контролю в Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации от 30 июня 1998 года № 681 с изменениями на 25 марта 2020 года № 275 (Официальный интернет-портал правовой информации www.pravo.gov.ru, 17.03.2020, N 0001202003170008). – М.: Собрание законодательства Российской Федерации, 1998. – 21 с.
44. Эффективность применения минеральных удобрений при возделывании твердой озимой пшеницы сорта Агат Донской в южной зоне Ростовской области / А.В. Алабушев, А.С. Попов, Г.В. Овсянникова, А.А. Сухарев, Н.Е. Самофалова, Н.С. Кравченко // *Зерновое хозяйство России*. – 2018. – № 60. – С. 3–9.
45. Участие растений в формировании состава полициклических ароматических углеводородов торфяников / Е.В. Яковлева, Д.Н. Габов, Р.С. Василевич, Н.Н. Гончарова // *Почвоведение*. – 2020. – № 3. – С. 316–329.
46. Оценка влияния бенз[а]пирена на биологическую активность чернозема Ростовской области / Т.В. Минникова, С.Н. Сушкова, С.С. Манджиева, Т.М. Минкина, С.И. Колесников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 12. – С. 91–102.
47. Полициклические ароматические углеводороды в мерзлотных бугристых торфяниках криолитозоны / Д.Н. Габов, Е.В. Яковлева, Р.С. Василевич, О.Л. Кузнецов, В.А. Безносиков // *Почвоведение*. – 2019. – № 9. – С. 1049–1062.
48. Яковлева Е.В., Габов Д.Н. Полициклические ароматические углеводороды в растениях естественных бугристых болот // *Принципы экологии*. – 2019. – № 32. – С. 119–128.

Поступила 05.12.2020 г.

Информация об авторах

Сушкова С.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института биологии Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

Яковлева Е.В., кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории химии почв отдела почвоведения Института биологии Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

Минкина Т.М., доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

Габов Д.Н., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник экоаналитической лаборатории Института биологии Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук.

Антоненко Е.М., кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

Дудникова Т.С., студент кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

Барбашев А.И., студент кафедры почвоведения и оценки земельных ресурсов Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

Минникова Т.В., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник НОЦ «Экология и природопользование» Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Колесников С.И., доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования Академии биологии и биотехнологии Южного федерального университета.

Раджпут В.Д., PhD, старший научный сотрудник Научно-исследовательского института биологии Академии биологии и биотехнологии им. Д.И. Иванова Южного федерального университета.

UDC [504.43 + 504.73] .054: 547.912

ACCUMULATION OF BENZO[A]PYRENE IN PLANTS OF DIFFERENT SPECIES AND ORGANOGENIC HORIZON OF SOILS OF STEPPE PHYTOCENOSIS UNDER TECHNOGENIC POLLUTION

Svetlana N. Sushkova¹,
terra_rossa@mail.ru

Evgenia V. Yakovleva²,
kaleeva@ib.komisc.ru

Tatiana M. Minkina¹,
tminkina@mail.ru

Dmitriy N. Gabov²,
gabov@ib.komisc.ru

Elena M. Antonenko¹,
antonenko1102@yandex.ru

Tamara S. Dudnikova¹,
tyto98@yandex.ru

Andrey I. Barbashev¹,
barbashev_andrei@mail.ru

Tatiana V. Minnikova¹,
loko261008@yandex.ru

Sergey I. Kolesnikov¹,
kolesnikov@sfedu.ru

Vishnu D. Rajput¹,
rajput.vishnu@gmail.com

¹ Southern Federal University,
194/1, Stachki avenue, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

² Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya street, Syktyvkar, 167982, Russia.

The relevance of the research. Despite a significant amount of research of environmental pollution by polyarenes, there is insufficient information on accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons, and in particular the most toxic benzo[a]pyrene, by various types of herbaceous plants, which determines the relevance of research in this direction. The distribution of benzo[a]pyrene over plant organs and organogenic horizons of soils in the Novochoerkassk Power Station effect zone was studied.

The main aim was to study the accumulation of benzo[a]pyrene in plants of different species and the organogenic soil horizon of steppe phytocenoses depending on the distance from Novochoerkassk Power Station.

Objects. In the coverage area of the Novochoerkassk Power Station, the samples of the aerial and root parts of plants and the underlying soil horizons of the organogenic layers were taken to a depth of 0–20 cm. For the study on monitoring sites, dominant species of herbaceous plants: ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), Austrian wormwood (*Artemisia austriaca* Jack.), noble yarrow (*Achillea nobilis* L.), common chicory (*Cichorium intybus* L.), common tansy (*Tanacetum vulgare* L.), creeping wheatgrass (*Elytrigia repens* (L.) Nevski.) were selected. The cereals: oatmeal (*Avena fatua*), wheat (*Triticum aestivum* L.), oats (*Avena sativa* L.), Wallis fescue or fescue (*Festuca valesiaca* L.), common reed (*Phragmites australis* L.), meadow bluegrass (*Poa pratensis* L.) were studied as well.

Methods. The content of benzo[a]pyrene in plants was determined by the standard method RD 52.10.556-95 in a modification that allows removing interfering lipid macrocomponents of plants by saponification (saponification method). When benzo[a]pyrene was determined by the method of saponification, the saponifiable lipid fraction was initially removed in the samples by boiling the plant sample in an alcohol solution of alkali, followed by threefold extraction of benzo[a]pyrene with hexane. The basis for determination of benzo[a]pyrene in soils is the PND 16.1:2:2. 2:3. 39-03 technique. Quantitative determination of benzo[a]pyrene in the extract was carried out by high performance liquid chromatography.

The results. Based on cluster analysis, three groups of herbaceous plants were identified by the level of benzo[a]pyrene content: weak, medium, and active accumulation. The maximum levels of benzo[a]pyrene accumulation were found for fescue, and the minimum for ragweed. It was found that the mass fraction of benzo[a]pyrene in soils and plants naturally decreased with distance from the enterprise. Maximum pollution was detected by the transect of the general direction, 1,6 km from the source. The least polluted sites were laid in the eastern direction. A study of polyarenes accumulation in different organs of plants showed that the roots of all the species studied differed the greatest pollution. The mass fraction of benzo[a]pyrene in the organogenic horizon of soils significantly exceeded its content in plants of various species.

Key words:

Benzo[a]pyrene, coal burning, herbaceous plants, soil, bioaccumulation, industrial pollution.

The reported research was funded by Russian Foundation for Basic Research project no. 19-74-10046.

REFERENCES

- Gennadiyev A.N., Pikovskiy Yu.I., Florovskaya V.N., Alekseeva T.A., Kozin I.S., Ogloblina A.I., Ramenskaya M.E., Teplitskaya T.A., Shurubor E.I. *Geokhimiya politsiklicheskikh aromatischeskikh uglevodorodov v gornykh porodakh i pochvakh* [Geochemistry of polycyclic aromatic hydrocarbons in rocks and soils]. Moscow, MGU Publ., 1996. 196 p.
- Nikolaeva O., Tikhonov V., Vecherskii M., Kostina N., Astaika A. Ecotoxicological effects of traffic-related pollutants in roadside soils of Moscow. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, vol. 17215, pp. 538–546.
- Yurdakul S., Çelik I., Çelen M., Öztürk F., Cetin B. Levels, temporal/spatial variations and sources of PAHs and PCBs in soil of a highly industrialized area. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 1227–1238.

4. Liu Yu., Gao P., Su J., Da Silva E. B., Ma L. Q. PAHs in urban soils of two Florida cities: Background concentrations, distribution, and sources. *Chemosphere*, 2019, vol. 214, pp. 220–227.
5. Cabrerizo A., Dachs J., Barceló D. Development of a soil fugacity sampler for determination of air–soil partitioning of persistent organic pollutants under field controlled conditions. *Environmental science & technology*, 2009, vol. 43, pp. 8257–8263.
6. Zhu X., Ni X., Waigi M., Liu J., Sun K., Gao Y. Biodegradation of mixed PAHs by PAH-degrading endophytic bacteria. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2016, vol. 13, article no. 805.
7. Wawra A., Friesl-Hanl W., Puschenreiter M., Soja G., Reichenauer Th., Roithner C., Watzinger A. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons in a mixed contaminated soil supported by phytostabilisation, organic and inorganic soil additives. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 628, pp. 1287–1295.
8. Fismes J., Perrin Ganier C., Empereur Bissonnet P., Morel J.L. Soil-to-root transfer and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons by vegetables grown on industrial contaminated soils. *Journal of Environmental Quality*, 2002, vol. 31, pp. 1649–1656.
9. Galiulin R.V., Bashkin V.N. Osobennosti povedeniya stojkih organicheskikh zagryaznitel' v sisteme atmosferye vypadeniya-rastenie–pochva [Features of the behavior of persistent organic pollutants in the atmospheric precipitation–plant–soil system]. *Agrokimiya*, 1999, no.12, pp. 69–77.
10. Konstantinova E.Yu., Sushkova S.N., Minkina T.M., Antonenko E.M., Konstantinov A.O., Horoshavin V.Yu. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the soils of industrial and residential zones of Tyumen. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 8, pp. 66–79. In Rus.
11. Sushkova S., Minkina T., Turina I., Mandzhieva S., Bauer T., Zamulina I., Kizilkaya R. Benzo[a]pyrene contamination in Rostov Region of Russian Federation: A 10-year retrospective of soil monitoring under the effect of long-term technogenic pollution. *Eurasian J. Soil Sci.*, 2016, vol. 5, pp.155–165.
12. Umeh A.C., Panneerselvan L., Duan L., Naidu R., Semple K.T. Bioaccumulation of benzo[a]pyrene nonextractable residues in soil by *Eisenia fetida* and associated background-level sublethal genotoxicity (DNA single-strand breaks). *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 69115, pp. 605–610.
13. Zhu Q., Wu Y., Zeng J., Wang X., Lin X. Influence of bacterial community composition and soil factors on the fate of phenanthrene and benzo[a]pyrene in three contrasting farmland soils. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 247, pp. 229–237.
14. Doegowska S., Migaszewski Z.M. PAH concentration sin the moss species *Hylacomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. from the Kielce area (south-central Poland). *Ecotoxicology and Environmental Safe*, 2011, vol. 74, pp. 1636–1644.
15. Wu Q., Wang X., Zhou Q. Biomonitoring persistent organic pollutants in the atmosphere with mosses: Performance and application. *Environment International*, 2014, vol. 66, pp. 28–37.
16. Vingiani S., De Nicola F., Purvis W. O., Concha-Grana E., Muniategui-Lorenzo S., Lopez-Mahia P., Giordano S. Active biomonitoring of heavy metals and PAHs with mosses and lichens: a case study in the cities of Naples and London. *Water Air and Soil Pollution*, 2015, vol. 226, pp. 1–12.
17. Iodice P., Adamo P., Capozzi F., Di Palma A., Senatore A., Spagnuolo V., Giordano S. Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, pp. 1410–1419.
18. Zhang Y.F., Shotyk W., Zacccone C., Noernberg T., Pelletier R., Bicalho B., Froese D.G., Davies L., Martin J.W. Airborne petcoke dust is a major source of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Athabasca oil sands region. *Environmental Science & Technology*, 2016, vol. 50, pp. 1711–1720.
19. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A. Temporary changes in the content of polyarenes in soils and plants of the lower tier of the southern tundra under the influence of the coal mining industry. *Bulletin RUDN. Series: Ecology and Life Safety*, 2017, vol. 25, no. 2, pp. 271–293. In Rus.
20. Belyh L.I. Politsiklicheskie aromatische uglevodorody v prirodno-tekhnogennykh sredakh Yuzhnogo Pribykalya [Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural and technogenic environments of the South Baikal region]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*, 2005, no. 6, pp. 539–551.
21. Jia J., Bi C., Zhang J., Jin X., Chen Z. Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: sources, exposure and risk of cancer. *Environmental Pollution*, 2018, vol. 241, pp. 750–758.
22. Feng J., Li X., Zhao J., Sun J. Distribution, transfer, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil-wheat systems of Henan Province, a typical agriculture province of China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, vol. 24, pp. 18195–18203.
23. Tian K., Bao H., Liu X., Wu F. Accumulation and distribution of PAHs in winter wheat from areas influenced by coal combustion in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, vol. 25, pp. 23780–23790.
24. Gbeddy G., Egodawatta P., Goonetilleke A., Ayoko G., Chen L. Application of quantitative structure-activity relationship (QSAR) model in comprehensive human health risk assessment of PAHs, and alkyl-, nitro-, carbonyl-, and hydroxyl-PAHs laden in urban road dust. *Journal of hazardous materials*, 2020, vol. 383, pp. 121–154.
25. Khalil A., Al-Daoude A. Determination of gamma irradiation effects on polycyclic aromatic hydrocarbons content in wheat brans and endosperms using HPLC/FLT analysis. *Journal of Consumer Protection and Food Safety*, 2018, vol. 13, pp. 407–412.
26. Zhang H., Hu J., Qi Y., Li C., Chen J., Wang X., Zhang L. Emission characterization, environmental impact, and control measure of PM_{2.5} emitted from agricultural crop residue burning in China. *Journal of Cleaner Production*, 2017, vol. 149, pp. 629–635.
27. Demina O.N. Ekologo-biomorfologicheskii analiz stepnoy tsenoflory basseyna Dona [Ecological and biomorphological analysis of the steppe coenoflora of the Don basin]. *Yug Rossii: ekologiya, razvitiye*, 2011, no. 1, pp. 31–40.
28. Makovskaya T.I., Dyachkova S.G. Organicheskie zagryazniteli v pochvenno-rastitelnom pokrove zony vliyaniya shpalopropitochnoho proizvodstva [Organic pollutants in the soil – vegetation cover of the zone of influence of sleeper impregnation production]. *Vestnik Kras GAU*, 2009, no.6, pp. 67–72.
29. Yang Q., Luo T., Yang J., Chen H. PAHs accumulations in plant leaves around coal-fired power plant and identification of their potential use as bioindicators. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 2019, no. 76, pp. 346–355.
30. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils and lower-layer plants of the southern shrub tundra under technogenic conditions. *Eurasian Soil Science*, 2014, no. 47, pp. 562–572.
31. Yakovleva E.V., Gabov D.N., Beznosikov V.A. Nakoplenie politsiklicheskikh aromaticheskikh uglevodorodov v rasteniyakh tundrovoy zony pri dobyche uglya otkrytym sposobom [Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of the tundra zone during open pit coal mining]. *Vestnik instituta biologii RAN*, 2016, no. 4, pp. 24–33.
32. Solntseva M.P., Glazunova K.P. Influence of industrial and transport pollution of the environment on the reproduction of seed plants. *Zhurnal Obshchei Biologii*, 2010, vol. 71, no. 2, pp. 163–175. In Rus.
33. De Nicola F., Spagnuolo V., Baldantoni D., Sessa L., Alfani A., Bargagli R., Monaci F., Terracciano S., Giordano S. Improved biomonitoring of airborne contaminants by combined use of holm oak leaves and epiphytic moss. *Chemosphere*, 2013, vol. 92, pp. 1224–1230.
34. Terzaghi E., Zaccchello G., Scacchi M., Raspa G., Jones K.C., Cerabolini B., Di Guardo A. Towards more ecologically realistic scenarios of plant uptake modeling for chemicals: PAHs in a small forest. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 505, pp. 329–337.
35. Privalenko V.V., Mazurenko V.T., Panaskov V.I., Mukhin N.V. *Ekologicheskie problemy goroda Kamensk-Shakhtinskogo* [Ecological problems of the city of Kamensk-Shakhtinsky]. Rostov n/D, ZAO «Cvetnaya pechat» Publ., 2000. 152 p.
36. Ermolaeva O.Yu., Myasnikova M.A. Floristicheskie osobennosti zaleznykh uchastkov stepy Rostovskoy oblasti [Floristic features of fallow plots of the steppes of the Rostov region]. *APRIORI. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki*, 2014, no. 3, pp.1–17.
37. Kurochkin V.N. Analysis of development trends in the agricultural sector of the Rostov region. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*, 2014, no. 25, pp. 56–70. In Rus.
38. Ribeiro J., Silva T.F., Mendonca Filho J.G., Flores D. Fly ash from coal combustion – an environmental source of organic compounds. *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 44, pp. 103–110.

39. Chaplygin V., Minkina T., Mandzhieva S., Burachevskaya M., Sushkova S., Antonenko E., Poluektov E., Kumacheva V. The effect of technogenic emissions on the heavy metals accumulation by herbaceous plants. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190, no. 3, article number 124.
40. PND F 16.1:2.2. 2:3. 39-03. *MVI massovoy doli benz(a)pirena v probakh pochv, gruntov, donnykh otlozheniy i tverdykh otkhodov metodom VEZHKh s ispolzovaniem zhidkostnogo khromatografa «Lyumakhrom»* [MVI of the mass fraction of benzo [a] pyrene in samples of soils, soils, bottom sediments and solid waste by HPLC using a Lumachrom liquid chromatograph]. Moscow, Lumex Publ., 2003. 27 p.
41. GOST 27262-87. *Korma rastitelnogo proiskhozhdeniya. Metody otbora prob* [State Standart 27262-87. Feed of plant origin. Sampling Methods 1988-07-01]. Moscow, StandardInform Publ., 2002. 9 p.
42. GOST 17.4.4.02-2017. *Okhrana prirody. Pochvy. Metody otbora i podgotovki prob dlya khimicheskogo, bakteriologicheskogo, gelmintologicheskogo analiza* [State Standart 17.4.4.02-2017. Protection of Nature. Soils. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 9 p.
43. *Ob utverzhdenii perchnya narkoticheskikh sredstv, psikhotropnykh veshchestv i ikh prekursorov, podlezhashchikh kontrolyu v Rossiyskoy Federatsii. Postanovlenie Pravitelstva Rossiyskoy Federatsii ot 30 iyunya 1998 goda № 681 s izmeneniyami na 25 marta 2020 goda № 275 (Ofitsialny internet-portal pravovoy informatsii www.pravo.gov.ru, 17.03.2020, N 0001202003170008)* [On approval of the list of narcotic drugs, psychotropic substances and their precursors subject to control in the Russian Federation. Decree of the Government of the Russian Federation of June 30, 1998 N 681 as amended on March 25, 2020 No. 275 (Official Internet portal of legal information www.pravo.gov.ru, 03/17/2020, N 0001202003170008)] Moscow, Collection of legislation of the Russian Federation Publ., 1998. 21 p.
44. Alabushev A.V., Popov A.S., Ovsyannikova G.V., Sukharev A.A., Samofalova N.E., Kravchenko N.S. Effektivnost primeneniya mineralnykh udobreniy pri vozdeystvii tverдой ozimoy pshenitsy sorta Agat Donskoy v yuzhnoy zone Rostovskoy oblasti [The effectiveness of the use of mineral fertilizers in the cultivation of winter hard wheat of the Agat Donskoy variety in the southern zone of the Rostov Region]. *Zernovoe hozyaystvo Rossii*, 2018, no. 60, pp. 3–9.
45. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Vasilevich R.S., Goncharova N.N. Participation of Plants in the Formation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Peatlands. *Eurasian Soil Science*, 2020, no. 3, pp. 317–329.
46. Minnikova T.V., Sushkova S.N., Mandzhieva S.S., Minkina T.M., Kolesnikov S.I. Evaluation of the effect of benz[a]pyrene on the biological activity of chernozem in the Rostov region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 12, pp. 91–102. In Rus.
47. Gabov D.N., Yakovleva E.V., Vasilevich R.S., Kuznetsov O.L., Beznosikov V.A. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Peat Mounds of the Permafrost Zone. *Eurasian Soil Science*, 2019, no. 9, pp. 1038–1050.
48. Yakovleva E.V., Gabov D.N. Politsiklicheskie aromatcheskie uglevodorody v rasteniyakh estestvennykh bugristykh bolot [Polycyclic aromatic hydrocarbons in plants of natural tuberous bogs]. *Principy ekologii*, 2019, no. 32, pp. 119–128.

Received: 5 December 2020.

Information about the authors

Svetlana N. Sushkova, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Evgenia V. Yakovleva, Cand. Sc., researcher, IB Komi SC UB RAS.

Tatiana M. Minkina, Dr. Sc., professor, head of the department, Southern Federal University.

Dmitriy N. Gabov, Cand. Sc., senior researcher, IB Komi SC UB RAS.

Elena M. Antonenko, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Tamara S. Dudnikova, student, Southern Federal University.

Andrey I. Barbashev, student, Southern Federal University.

Tatiana V. Minnikova, Cand. Sc., senior researcher, Southern Federal University.

Sergey I. Kolesnikov, Dr. Sc., professor, head of the department, Southern Federal University.

Vishnu D. Rajput, PhD, senior researcher, Southern Federal University.

УДК 621.314.1:621.382.2

БИФУРКАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ С ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Михальченко Сергей Геннадьевич¹,
msg@ie.tusur.ru

Михальченко Геннадий Яковлевич¹

Семенов Сергей Михайлович²,
ssm@tpu.ru

Мещеряков Павел Сергеевич¹,
mps@ie.tusur.ru

Воронина Наталья Алексеевна²,
voronina@tpu.ru

Зюзов Анатолий Михайлович³,
a.m.zyuzev@urfu.ru

¹ Томский университет систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 640050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 640050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Уральский федеральный университет,
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

Статья посвящена изучению влияния бифуркационных явлений, имеющих место во всех типах импульсно-модуляционных систем, которые в частности присутствуют в ветрогенераторных установках. Для исследования динамики преобразователя напряжения с частотно-импульсной модуляцией строится математическая модель и бифуркационные диаграммы, которые иллюстрируют область безопасной работы ветрогенераторных установок, проводится ряд численных экспериментов. Выявлен новый вид бифуркационного явления, названный в данной статье «пакетной» бифуркацией.

Актуальность работы обуславливается необходимостью улучшения энергоэффективности силовых преобразовательных устройств для потребностей нетрадиционной энергетики, в частности – для ветрогенераторной установки. Одна из сложностей преобразования данного вида энергии заключается в невысоком уровне эффективности процесса. Ввиду переменной величины частоты вращения лопастей ветрогенераторной установки в определенном временном интервале параметры получаемой энергии также варьируются, следовательно, настройки её вторичных преобразователей должны соответствовать временным интервалам формирования сигнала генерации. Повышение качества функционирования альтернативных источников питания возможно за счет использования многочастотных режимов стабилизации устройства преобразования. В статье рассматривается модель импульсно-модуляционного понижающего преобразователя напряжения на основе частотно-импульсной модуляции. Изучены и предложены методики изменения ширины рабочей зоны одночастотного режима стабилизации.

Цель: анализ режимов вторичного преобразователя напряжения ветрогенераторной установки и выработка подходов к исследованию бифуркационных явлений, имеющих место в преобразовательных структурах с частотно-импульсной модуляцией путем построения математической модели и численно-аналитического моделирования данного понижающего устройства для улучшения показателей надежности.

Методы: проработка литературных источников по типовым схемам передачи энергии в ветрогенераторную установку с промежуточным звеном постоянного тока (DC/DC преобразователей); математическое моделирование и проведение численных экспериментов по изменению эксплуатационных данных понижающего преобразователя напряжения с частотно-импульсной модуляцией для выявления протекающих в нем бифуркационных процессов; построение бифуркационных диаграмм при различных параметрах преобразователя с целью повышения надежности работы.

Результаты. Получены математические модели и численно-аналитическая методика построения с идентификацией динамических режимов функционирования понижающего преобразователя напряжения с частотно-импульсной модуляцией, выступающего в роли звена постоянного тока ветрогенераторной установки; построены бифуркационные диаграммы для стабилизации напряжения при различных параметрах системы управления; показано одновременное наличие одночастотных и пакетных режимов работы; идентифицирована бифуркация деления периода; изучено влияние параметров устройства на режимы работы, а также предложена методика изменения ширины рабочей зоны одночастотного режима стабилизации.

Ключевые слова:

Ветрогенерация, понижающий преобразователь напряжения, частотно-импульсная модуляция, коммутационная функция, бифуркационная диаграмма, одночастотный режим стабилизации.

Введение

Глобальный совет по ветроэнергетике (*Global Wind Energy Council – GWEC*) опубликовал итоговый отчет о ежегодном обновлении рынка ветроэнергетики (*Global Wind Report: Annual Market Update*). В нем говорится, что в мировом масштабе в 2016 г. установлено более 54 ГВт источников чистой возобновляемой энергии ветра в более чем 90 странах. Из них девять государств (рис. 1) увеличили соответствующего вида мощности за 10000 МВт, а 29 прошли отметку 1000 МВт [1].

Генеральный секретарь GWEC Стив Сойер заявил: «Власть ветра теперь успешно конкурирует с сильно

субсидируемыми операторами по всему миру, создавая новые отрасли промышленности, сотни тысяч рабочих мест и направляя человечество к будущему чистой энергии. В энергетике сейчас доминирует целый ряд широко распространенных возобновляемых источников энергии. Наша цель – получить систему электроэнергетики с нулевой эмиссией до 2050 года, если мы хотим достичь наших целей в области изменения климата и развития» [1].

На рис. 2 приведена суммарная емкость рынка ветроэнергетики, возросшая к концу 2017 г. на 12,6 % и достигнувшая в общей сложности 486,8 ГВт.

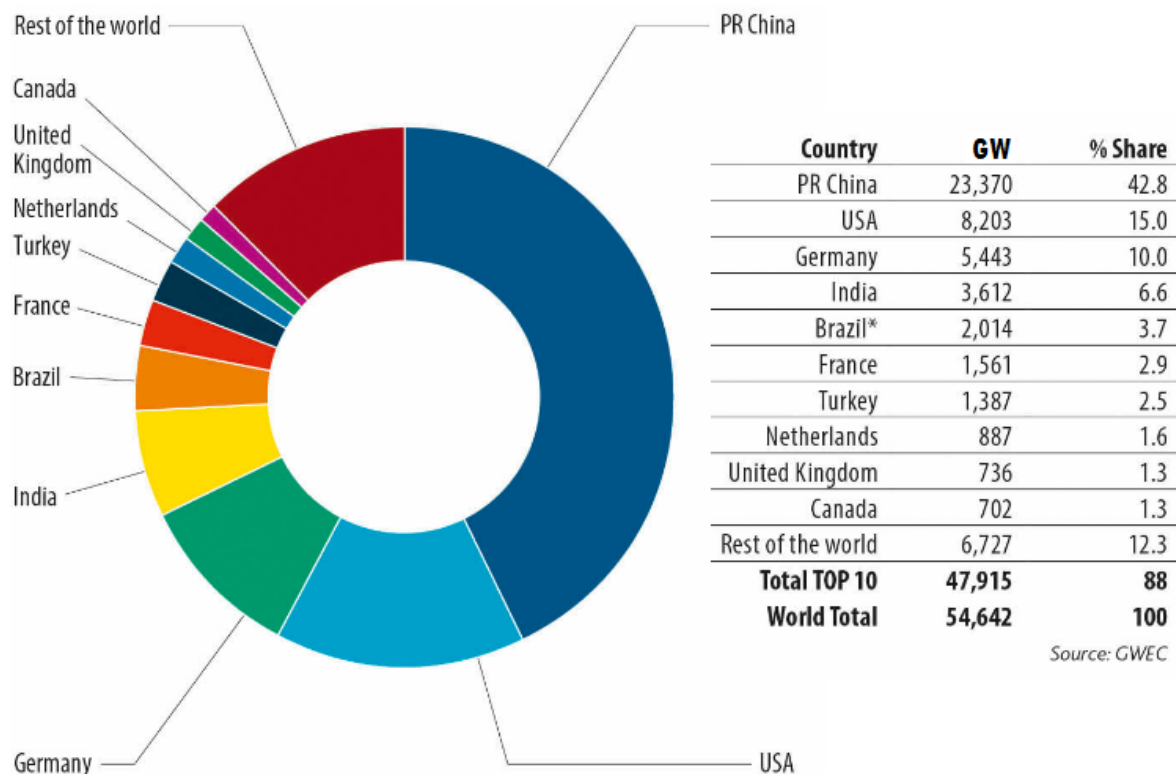


Рис. 1. Ветроэнергетика: десятка лидеров установки новых мощностей в 2016 г. [1]

Fig. 1. Wind power engineering: ten leaders in new capacity installation in 2016 [1]

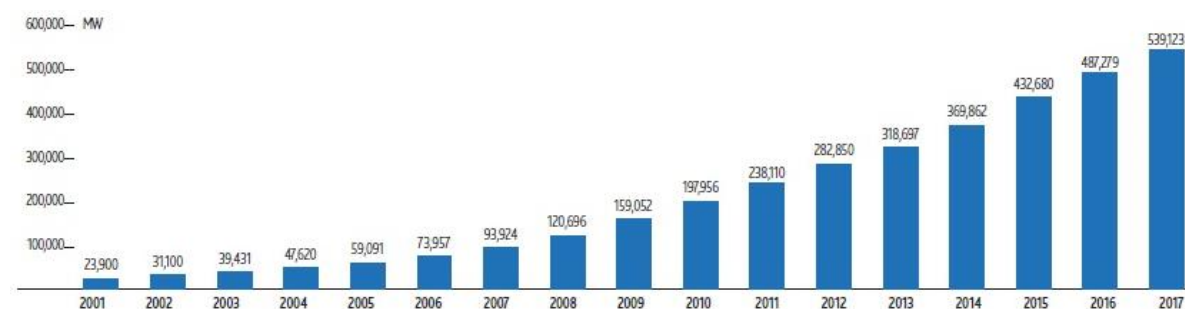


Рис. 2. Ветроэнергетика: совокупная установленная мощность 2001–2017 гг. [1]

Fig. 2. Wind power engineering: the total installed capacity in 2001–2017 years [1]

Каково же положение российской ветроэнергетики в мире? Россия включилась в число стран, поддерживающих технологии возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в 2013 г., когда вышло постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых

источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» [2]. Действие данного постановления было продлено распоряжением Правительства РФ от 05 мая 2016 № 850-р «О продлении программы поддержки ВИЭ до 2024 года» [3].

Этими законодательными актами сформулированы перспективы развития оптового рынка ветрогенерации в России: до 2024 г. будет построено 3600 МВт ветропарков, причем это довольно скромная величина. Достигнув её, страна даже вряд ли попадет в десятку мировых лидеров развития ВИЭ. Значит, нет сомнений в необходимости повышения эффективности работы в данном направлении [4].

В ветроэнергетике за последние 10 лет стоимость выработки киловатт-часа упала в три раза за счет увеличения объема выпуска ветрогенераторов и применения более совершенных моделей.

Действующие в России меры поддержки ВИЭ создают возможности для развития этого направления, в том числе для местного производства соответствующего оборудования. В то же время точечные меры не могут в полном объеме компенсировать недостатки среды в целом. Высокая стоимость капитала, дефицит финансовых ресурсов и начинающаяся рецессия 2020 г. затрудняют промышленное развитие России, в том числе и ветроэнергетическое машиностроение.

На данном этапе перспективным является рост возобновляемых источников энергии на местном уровне, в коллективных и индивидуальных хозяйствах, в том числе и автономных вариантах. Последний пункт служит хорошим источником для развития ветроэнергетики в регионах. В ситуации, когда цен-

трализованной энергией обеспечено только 40 % территории России, ВИЭ можно считать серьезной альтернативой «северному завозу» – транспортировке энергетических ресурсов в удаленные районы. Для автономных хозяйств, удаленных от централизованных ВИЭ, это тройная выгода: социальная, экономическая и экологическая [5].

Обоснование выбора системы управления ветроустановкой

Достаточно большое количество научных статей по направлению «ветрогенерация» посвящены анализу вариантов конструктивных решений ветроустановок, параметров воздушных потоков [6, 7], и это понятно – существенные потери содержит их механическая составляющая. Однако стоит обратить внимание и на электрическую преобразовательную часть устройств [8].

Основные отличия схем электрических соединений состоят в конструкции и типе генераторов [9], а также в наличии регулирующих аппаратов. Для систем ветрогенерации средней и малой мощности с повышенными показателями качества и техническими параметрами, как правило, применяются структуры с узлами выпрямления и инвентирования (рис. 3) или частотного регулирования сигнала. Данная статья посвящена использованию частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) в звене постоянного тока (DC\DC).

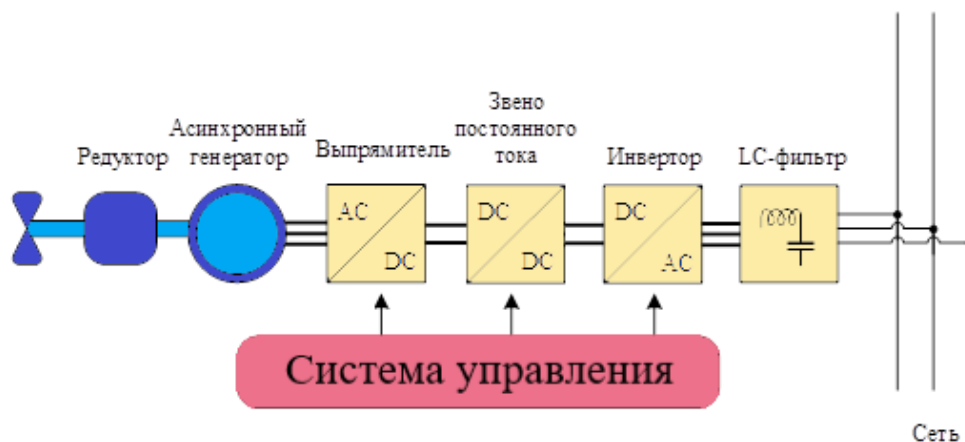


Рис. 3. Типовая структура ветрогенераторной установки [9]

Fig. 3. Typical structure of a wind generator set [9]

Применение именно ЧИМ в непосредственном стабилизаторе напряжения обусловлено наличием высших гармоник в выпрямленном сигнале, поступившем от электрогенератора [10]. Перед промежуточным высокочастотным преобразователем напряжения (ПН) ставится кроме этого еще ряд задач: отбор максимальной мощности (*Maximum Power Point Tracking, MPPT*) [11, 12], электромагнитной совместимости (*Electromagnetic Compatibility, EMC*) и самая главная – стабилизации уровня сигнала [13].

Сложности, возникающие на этом этапе, в основном связаны с нелинейностью и аномальностью динамики импульсно-модуляционных преобразователей. Авторам не встречались устройства такого типа, для

которых в пространстве рабочих параметров отсутствовали бы аномальные режимы работы. Не стал исключением и преобразователь напряжения с ЧИМ, выполняющий роль звена постоянного тока ветрогенераторной установки [14, 15].

Исходя из сказанного, делается попытка выявить возможные недокументированные аномальности в работе ПН с ЧИМ посредством бифуркационного анализа. Для этого применяется параметрический синтез карты динамических режимов ПН с ЧИМ данной структуры с целью получить характеристики запаса устойчивости преобразователя и его динамические свойства с точки зрения внешних воздействий [16, 17].

Анализ математической модели преобразователя

За основу исследования была выбрана математическая модель понижающего DC/DC-преобразователя напряжения, анализ нелинейной динамики с широтно-импульсным управлением которым приведен в [16, 17]. Он относится к системам с частотно-импульсной. На рис. 4 изображена схема замещения понижающего преобразователя с ЧИМ.

При построении модели приняты допущения аналогичные приведенным в источниках [14–17].

Приведенная схема описывается математической моделью в виде задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений.

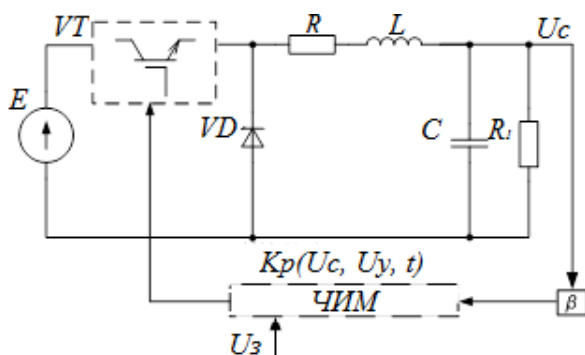


Рис. 4. Схема замещения понижающего преобразователя с ЧИМ

Fig. 4. Electrical diagram of buck converter with a pulse-frequency modulation (PFM)

В состав рассматриваемой схемы входят: E – входное напряжение преобразователя; VT – полупроводниковый ключ; VD – диод; R, L, C – параметры непрерывной части, где R – характеризует омические потери дросселя фильтра, а также сопротивление ключа в открытом состоянии, R_n – сопротивление нагрузки; β – коэффициент передачи датчика обратной связи по напряжению U_c ; U_3 – задающее напряжение; ЧИМ – частотно импульсный модулятор.

Задача Коши для поиска периодического решения $X(t) = X(t+T)$ может быть поставлена в матричной форме:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dX}{dt} &= A(KF(\Theta), X) \cdot X + B(KF(\Theta), X), \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{C \cdot R_n} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ X &= \begin{bmatrix} i_L \\ U_c \end{bmatrix}, \quad X(t_0) = X_0, \quad X(t) = X(t+T) \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где X – вектор неизвестных; A – квадратная матрица параметров линейной части, характеризующая схему замещения; B – вектор внешних воздействий [17].

Функция $KF(\Theta)$, описывающая управляющую импульсную последовательность, является кусочно-линейной, таким образом, имеется возможность представить результат с использованием уравнения (1) на участках линейности KF .

Исследование параметров ЧИМ

Коммутационная функция $KF(\Theta)$ формируется блоком ЧИМ. Опишем логику его работы с изображением в виде структуры, приведенной на рис. 5.

Сигнал датчика обратной связи $\beta U_c(t)$ поступает на входное устройство, там же задается коэффициент усиления регулятора α . Этот блок является источником тока, управляемым напряжением (ИТУН), при этом регулирующим воздействием служит выражение ошибки $\alpha(U_3 - \beta U_c(t))$.

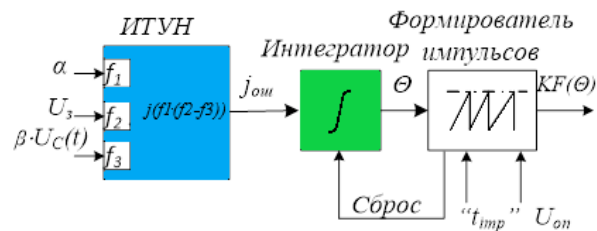


Рис. 5. Функциональная схема ЧИМ

Fig. 5. Chain diagram of the PFM

Желаемое выходное воздействие силового преобразователя задается напряжением U_3 . ИТУН генерирует токовый импульс j_{osh} , соответствующий уровню ошибки по напряжению, значения j_{osh} ограничены минимальными и максимальными величинами. Далее j_{osh} подается на блок интегратора, сигнал интегрирующего звена $\Theta(t)$ поступает на формирователь импульсов. Данный элемент представляет собой компаратор напряжения, срабатывающий по достижению $\Theta(t)$ уровня U_{on} после заданной временной задержки t_{imp} . Формируемый при этом импульс заданной длительности поступает на драйвер силового транзистора и одновременно является сигналом для сброса уровня интегратора.

На рис. 6 представлены графики, поясняющие алгоритм работы ЧИМ. Из него видно, что чем больше ток j_{osh} , тем выше частота $KF(\Theta)$. Длительность импульса есть постоянная величина, меняется только частота сигнала управления. Временные интервалы задержки срабатывания формирователя импульса и его длина равны. В момент $(k-1)\tau$ включается интегратор, и за некоторое время t_{up} сигнал $\Theta(t)$ достигает опорного напряжения U_{on} (момент времени z_n), в период временной задержки t_{imp} значение напряжения $\Theta(t)$ продолжает нарастать до уровня $U_{св}$ (или до $U_{сmax}$ при j_{max}), после t_{imp} происходит сброс напряжения интегратора. В момент $k\tau$ данный блок снова включается и процессы повторяются.

В рассматриваемой математической модели сигнал $\Theta(t)$ моментально сбрасывается во время формирования импульса, а в реальных системах (если будет использован емкостной накопитель) сброс энергии производится в течение конечного периода времени, в рамках импульса t_{imp} . Это условие ограничивает разработчика с одной стороны по параметрам конденсатора, применяемого в интеграторе, с другой – по длительности интервала t_{imp} .

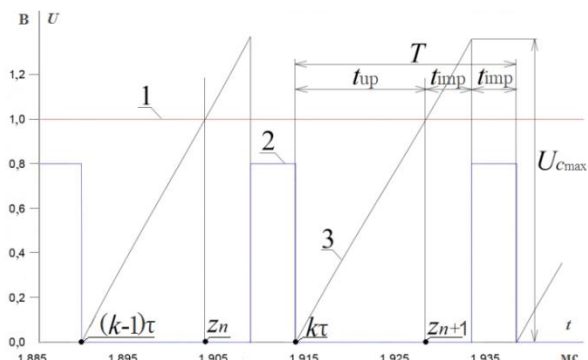


Рис. 6. Диаграммы формирования импульсной последовательности: 1 – опорное напряжение U_{on} ; 2 – импульсная последовательность KF ; 3 – сигнал интегратора Θ

Fig. 6. Diagrams of pulse sequence formation: 1 – reference voltage U_{on} ; 2 – pulse sequence KF ; 3 – integrator signal Θ

На основе функциональной схемы (рис. 5) разработана имитационная модель ЧИМ [12, 14, 18] с реализацией в имитационном комплексе LTSpice IV (Linear Technology, Co).

Далее приводится математическое выражение, описывающее работу модулятора. Токовый сигнал ошибки, генерируемый ИТУН (рис. 5), математически записывается следующим выражением:

$$j_{ош}(t) = \alpha \cdot (U_3 - \beta \cdot X2(t)), \quad j_{min} < j(t) < j_{max}, \quad (2)$$

где j_{min} , j_{max} – минимальный и максимальный токи ИТУН; α – коэффициент усиления сигнала ошибки; $(U_3 - \beta \cdot X2(t))$ – значение сигнала ошибки; U_3 – задающее напряжение; $X2(t)$ – моментальная величина напряжения на выходе преобразователя – воздействия, получаемого по обратной связи.

Интегрирование токового импульса осуществляется посредством заряда конденсатора:

$$\Theta(t) = \frac{1}{C_{sum}} \int_0^t j_{ош}(t) \cdot dt, \quad (3)$$

где C_{sum} – значение емкости интегрирующего конденсатора $C1$.

Компаратор формирует запаздывающую коммутационную функцию и может находиться в одном из двух дискретных значений: 1 – для открытого состояния транзистора VT и 0 – для закрытого. Условия данных состояний:

$$KF(t) = \begin{cases} 1, \Theta(t) > U_{on} \wedge (z_n + t_{imp}) \leq t \leq (z_n + 2t_{imp}) \\ 0, \Theta(t) > U_{on} \wedge (t < z_n + t_{imp}) \vee \Theta(t) < U_{on} \end{cases} \quad (4)$$

Зададимся максимальной частотой управляющего сигнала согласно теореме Котельникова. Асимптотическая максимальная частота определяется параметром t_{imp} и равна:

$$f_{maxa} = \frac{1}{2t_{imp}}. \quad (5)$$

Но из-за того, что система управления имеет конечную скорость нарастания сигнала интегратора,

она будет работать на более низких частотах. Выведем выражения для фактической максимальной частоты функционировать ЧИМ. Чем больше система отклоняется от необходимого параметра, тем больший ток генерируется ИТУН, соответственно тем выше частота управления. Примем, что ток этого источника равен максимальному возможному j_{max} – режим насыщения ИТУН.

Исходя из логики действия ЧИМ (его модель изложена выше) в управляющей импульсной последовательности существует два временных интервала, которые не изменяются, а именно время паузы и импульса. Временной промежуток t_{up} зависит от амплитуды тока ИТУН и от емкости конденсатора. Так как ток источника принимает постоянное значение, заряд конденсатора происходит на линейном участке траектории. Период управляющего сигнала (рис. 6) складывается из интервала заряда t_{up} до опорного напряжения и из двух интервалов импульса t_{imp} :

$$T = t_{up} + 2 \cdot t_{imp}. \quad (6)$$

Из уравнения (4) вычислим t_{up} и t_{imp} :

$$t_{imp} = \frac{C_{sum} \cdot (U_{cmax} - U_{on})}{j_{max}}, \quad t_{up} = \frac{C_{sum} \cdot (U_{on} - 0)}{j_{max}}. \quad (7)$$

Выражения (7) подставим в соотношение (6), тогда:

$$T = \frac{C_{sum}}{j_{max}} \cdot (2 \cdot U_{cmax} - U_{on}). \quad (8)$$

Зависимость (8) служит для расчета минимального периода сигнала управления. Из формулы (7) выразим C_{sum} , и, если максимальное напряжение интегрирующего конденсатора за время t_{imp} достигнет напряжения в N раз больше опорного: $U_{cmax} = N U_{on}$, тогда

$$C_{sum}(N) = \frac{t_{imp} \cdot j_{max}}{U_{on} \cdot (N - 1)}. \quad (9)$$

Подставим уравнение (9) в зависимость (8) и получим:

$$T(N) = t_{imp} \cdot \frac{(2N - 1)}{(N - 1)}, \quad (10)$$

или для частоты:

$$f_{max}(N) = \frac{1}{t_{imp}} \cdot \frac{(N - 1)}{(2N - 1)}. \quad (11)$$

Для конкретизации вычислений предположим $N=10$, $j_{min}=0$ А, $j_{max}=0,5$ А, $t_{imp}=5$ мкс, тогда:

$$C_{sum} = \frac{t_{imp} \cdot j_{max}}{(9 \cdot U_{on})} = \frac{5 \text{ мкс} \cdot 0,5 \text{ А}}{9 \cdot 1 \text{ В}} = 277,8 \text{ нФ},$$

$$f_{max} = \frac{1}{t_{imp}} \cdot \frac{(N - 1)}{(2N - 1)} = \frac{1}{5 \text{ мкс}} \cdot \frac{9}{19} = 94,7 \text{ кГц}.$$

Примем $C_{sum}=270$ нФ, расчетная максимальная частота f_{max} при этом равна 94,7 кГц.

Решение системы уравнений (2)–(5), (11) производится по методике построения стробоскопического отображения [16, 17] при следующем наборе фиксированных параметров:

$$P = \left\{ \begin{array}{l} E = 1040 \text{ В}; R_n = 100 \text{ Ом}; \\ R = 10,6 \text{ Ом}; L = 0,1 \text{ Гн}; C = 1 \text{ мкФ}; \\ \beta = 0,01; U_s = 2 \text{ В}; \\ U_{\text{оп}} = 1 \text{ В}; \alpha = 2; j_{\text{max}} = 0,5 \text{ А}; j_{\text{min}} = 0 \text{ А}; \\ C_{\text{sum}} = 270 \text{ нФ}; t_{\text{imp}} = 5 \text{ мкс}. \end{array} \right. \quad (12)$$

Параметры силовой части схемы подобраны таким образом, чтобы имелась возможность сравнить динамику исследуемого преобразователя с устройством, рассмотренным в [17], не прибегая к относительным единицам.

Поиск стационарных периодических режимов

Запишем общее решение исходной задачи (1) по аналогии с исследованиями в [16, 17] на участках линейности, согласно условию (4), определяемых функцией KF :

$$X(t) = e^{A(t-t_0)} (X_0 + A^{-1}B \cdot KF(\Theta)) - A^{-1}B \cdot KF(\Theta). \quad (13)$$

Это решение зависит от начальных условий интегрирования X_0 и t_0 – параметры тока и напряжения X_0 на левой границе t_0 интервала линейности.

1. С учетом формулы (13), на периоде времени $(k-1)T \leq t \leq z_n$ нарастания сигнала интегратора коммутационная функция принимает значение нуля, т.е. $B=[0,0]^T$ и тогда:

$$X(t) = e^{A1(t-(k-1)T)} \cdot (X_{k-1} + A1^{-1} \cdot B2) - A1^{-1} \cdot B2. \quad (14)$$

2. На интервале паузы $z_n \leq t \leq z_n + t_{\text{imp}}$ коммутационная функция также равна нулю, т.е. $B=[0,0]^T$, решение на этом участке соответственно примет вид:

$$X(t) = e^{A1(t_{\text{imp}})} \cdot (X_{z_n} + A1^{-1} \cdot B2) - A1^{-1} \cdot B2. \quad (15)$$

3. На отрезке времени $z_n + t_{\text{imp}} \leq t \leq z_n + 2t_{\text{imp}}$ коммутационная функция равна единице, т.е. $B=[E/L, 0]^T$, отсюда:

$$X(t) = e^{A1(t_{\text{imp}})} \cdot (X_{z_n+t_{\text{imp}}} + A1^{-1} \cdot B1) - A1^{-1} \cdot B1. \quad (16)$$

По выражениям (14)–(16) с учетом формул (3) и (4) построена математическая модель решения задачи (1) в среде Matlab. Для верификации моделирования в среде LTSpice IV, по аналогии с [16], разработана имитационная модель преобразователя.

Имитационное моделирование

Модель выполнена в среде LTSpice, представлена на рис. 7. Коммутационно-разрывная функция обратной связи $\text{func Foc}()$ задана в соответствии с соотношениями (2)–(4), полученные результаты учтены на рис. 8.

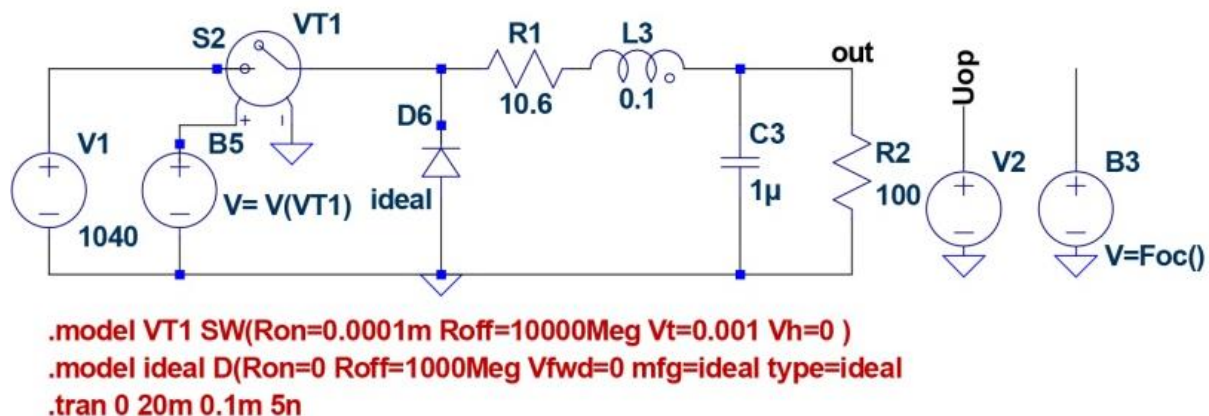


Рис. 7. Имитационная модель в среде LTSpice: V2 – источник задающего напряжения; $\text{func Foc}()$ – функция обратной связи; $V(U_z)$ – задающее напряжение; $V(\text{out})$ – выходное напряжение силовой части

Fig. 7. Simulation model in the LTSpice: V2 – the source of the set voltage; $\text{func Foc}()$ – feedback function; $V(U_z)$ – the set voltage; $V(\text{out})$ – the output voltage of the power part

Результаты имитационного и математического моделирования для двух вариантов приводятся ниже. Первый – для значения интегрирующего конденсатора $N=10$ и параметров блока (12). Полученная максимальная частота равна 94,64 кГц, а максимальная амплитуда заряда конденсатора – 10,1 В, что близко к расчетным величинам для опорного напряжения $U_{\text{оп}}$ в соответствии с формулами (9)–(11).

Проведем аналогичный численный эксперимент и соответствующий расчет с исходными данными: $U_{\text{сmax}}=2U_{\text{оп}}$, т.е. $N=2$. Вычисления осуществляем по соотношениям (9)–(11):

$$C_{\text{sum}} = \frac{t_{\text{imp}} \cdot j_{\text{max}}}{(U_{\text{оп}})} = 2500 \text{ нФ},$$

$$f_{\text{max}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{t_{\text{imp}}} \cdot \frac{(N-1)}{(2N-1)} = \frac{1}{3 \cdot 5 \text{ мкс}} = 66,7 \text{ кГц}.$$

Максимальная частота составит 66,55 кГц, а максимальная амплитуда заряда конденсатора составляет 2 В, или два опорных напряжения $U_{\text{оп}}$.

Можно сделать вывод, что выражения для максимальной частоты и интегрирующего конденсатора, в зависимости от параметров системы, описываемой уравнениями (9)–(11), определены верно.

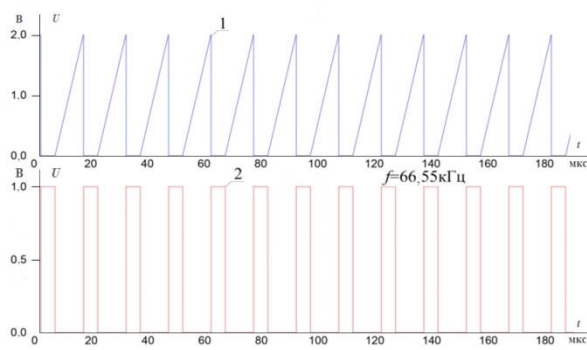


Рис. 8. Временные диаграммы при $N=2$: 1 – сигнал интегратора $\Theta(t)$; 2 – импульсная последовательность $KF(\Theta)$

Fig. 8. Time diagrams for $N=2$: 1 – integrator signal $\Theta(t)$; 2 – pulse sequence $KF(\Theta)$

Исследование динамики математической модели

Для изучения установившихся режимов работы преобразователя с ЧИМ получены бифуркационные диаграммы посредством реализации стробоскопического отображения в Matlab [19], алгоритм которого приведен в [17]. Для сравнения стробоскопическое отображение построено также по результатам имитационного моделирования в LTSpice IV со следующей последовательностью действий [16, 17, 20]:

- Проводится расчет выходного напряжения, полученные значения привязываются к временным точкам t_n при формировании выходного массива данных.
- Из массива отсекается переходный режим. В оставшейся части выделяются точки напряжения t_n , находящиеся на месте спада коммутационной функции.
- Массив состояний в точках стробоскопического отображения сохраняется для некоторого, выбранного в качестве варьируемого, параметра, и строится бифуркационная диаграмма, представляющая из себя зависимость массива состояний X системы от данного параметра.

На рис. 9 приводится бифуркационная диаграмма [16, 17, 20], представляющая для $N=6$ качественные параметры установившегося режима в зависимости от коэффициента усиления α регулятора (рис. 5).

Итоги моделирования (рис. 9) показывают, что при значениях параметра α меньше величины 3,2 большинство точек соответствуют одночастотному режиму типа меандр, мгновенные значения вектора неизвестных X и коммутационной функции KF для которых приведены на рис. 10, а, т. е. в установившемся режиме работы стабилизатора управляющий сигнал не разбивается на пакеты импульсов. Далее с ростом α преобладает пакетный режим (рис. 10, б).

По бифуркационной диаграмме четко видны аномальные явления в ПН с ЧИМ, при которых происходит качественное изменение установившегося режима – бифуркация деления периода, переход от номинального режима работы к аномальному, но детерминированному периодическому движению, при котором импульсы подаются пакетами (рис. 10, б).

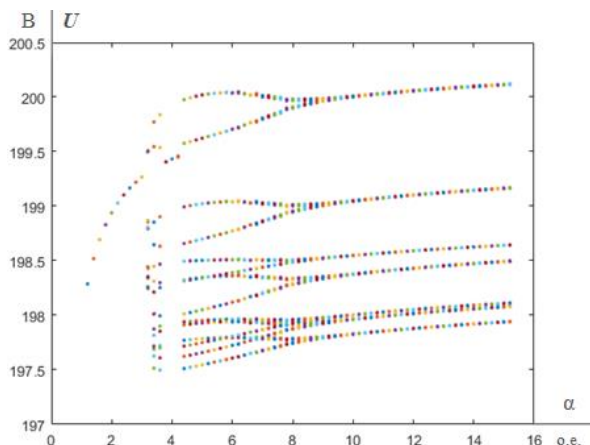


Рис. 9. Установившиеся режимы стабилизатора напряжения и их представление на бифуркационной диаграмме (расчет при нулевых начальных условиях)

Fig. 9. Steady modes of the voltage stabilizer and their representation on the bifurcation diagram (zero initial conditions calculation)

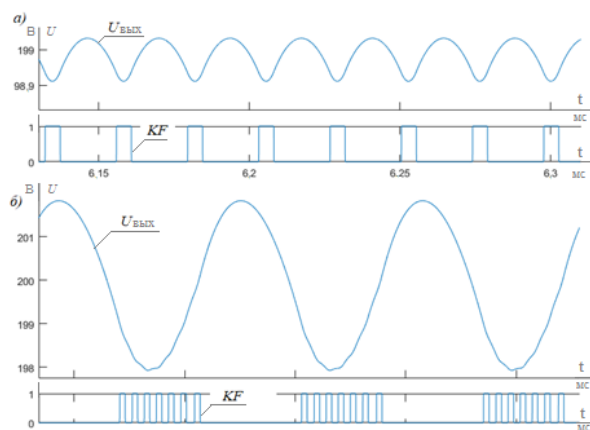


Рис. 10. Форма выходного сигнала и коммутационной функции: а) при $\alpha=2$, режим без разбиения на пакеты; б) при $\alpha=15$, режим с разбиением на пакеты

Fig. 10. Form of the output signal and switching function at $\alpha=2$, non-packeted mode; б) at $\alpha=15$, packeted mode

Построены также бифуркационные диаграммы для $C_{sum}=600$ нФ ($N=5,2$) (рис. 11) и $C_{sum}=2500$ нФ ($N=2$) (рис. 12) с локально изменяющимися начальными условиями.

Бифуркационные режимы (рис. 9–12) построены как посредством математической модели (2)–(4), (14)–(16), запрограммированной и вычисленной в среде Matlab, так и по имитационной модели в среде LTSpice IV. Результаты расчетов совпали как по качественным, так и по количественным значениям в математической и имитационной моделях с учетом принятых допущений [16–18] и погрешности численного метода системы автоматического проектирования. Количество линий на бифуркационной диаграмме в пакетном режиме равно числу импульсов в такте.

Бифуркационные диаграммы, приведенные на рис. 9–12, определяют области устойчивого функционирования преобразователя с точки зрения классической теории устойчивости Ляпунова – для номи-

нального режима работы (представленного на рисунке одноцикловым сигналом) комплексные мультипликаторы Ляпунова располагаются внутри единичной окружности, т. е. критерий устойчивости выполняется. Таким образом, данного вида бифуркационные диаграммы могут рассматриваться как графическое представление зоны устойчивого функционирования стабилизатора напряжения ВГУ.

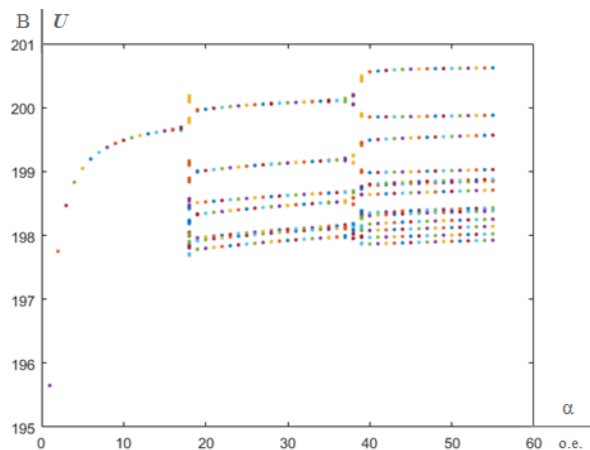


Рис. 11. Бифуркационная диаграмма ПН с ЧИМ при $N=5,2$, расчет при локально изменяющихся начальных условиях

Fig. 11. Bifurcation diagram of voltage converter with a PFM at $N=5,2$, varying initial conditions calculation

Общими чертами нелинейной динамики импульсно-модуляционного преобразователя с ЧИМ по результатам исследований при изменении параметров системы (12) являются:

- В многомерном пространстве параметров всегда существует область нормального режима работы, в которой должна находиться рабочая точка.
- Эта область не всегда односвязная, и она ограничена аномальными режимами, границы которых – точки бифуркации.
- Преобладающим типом бифуркационного перехода для ПН с ЧИМ является бифуркация деления периода, при которой появляется пакетный топологический режим, определяемый пакетами импульсов коммутационной функции.

логический режим, определяемый пакетами импульсов коммутационной функции.

- Изменение характера управления на пакетный вариант приводит к росту амплитуды пульсаций выходного сигнала.

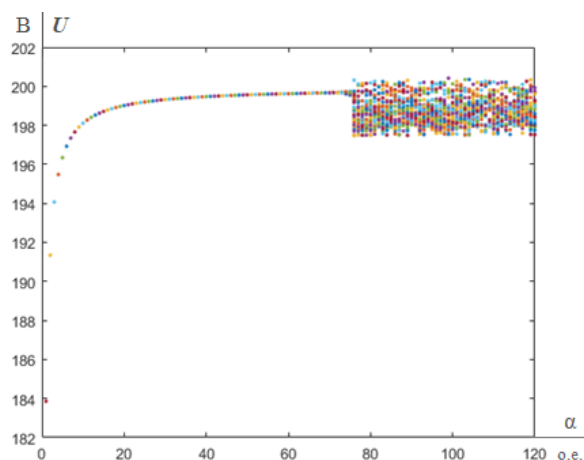


Рис. 12. Бифуркационная диаграмма ПН с ЧИМ при $N=2$, расчет при локально изменяющихся начальных условиях

Fig. 12. Bifurcation diagram of voltage converter with a PFM at $N=2$, varying initial conditions calculation

Заключение

Рассмотрены режимы работы стабилизатора с изучением влияния его параметров на функционирование системы на базе понижающего преобразователя с ЧИМ. Рассмотрено влияние параметров системы на режимы работы. Получены бифуркационные диаграммы для стабилизатора и разных параметров структуры управления. Показано одновременное наличие номинальных и пакетных режимов, описана бифуркация деления периода, которая может представлять опасность для устойчивой работы ВГУ. Границы области номинального режима работы преобразователя в многопараметрическом пространстве, представленные в виде бифуркационных диаграмм, описывают зону его устойчивости функционирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. GWEC Global statistic // Официальный сайт Global Wind Energy Council – GWEC. URL: <http://gwec.net/global-figures/graphs/> (дата обращения: 14.08.2020).
2. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 № 449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности» // ЭПС «Система ГАРАНТ». URL: <http://base.garant.ru/70388616/> (дата обращения: 14.08.2020).
3. Распоряжение Правительства РФ от 05 мая 2016 № 850-р «О продлении программы поддержки ВИЭ до 2024 года» // СПС КонсультантПлюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_197712/ (дата обращения: 15.08.2020).
4. Брызгунов И.М. Без иллюзий. Вся правда о перспективах российской ветроиндустрии // Официальный сайт Российской ассоциации ветроиндустрии РАВИ. URL: <https://rawi.ru/ru/bez-illyuziy-vsya-pravda-o-perspektivah-rossiyskoy-vetroindustrii/> (дата обращения: 15.08.2020).
5. Жихарев А. Оценка эффектов реализации программы поддержки ВИЭ до 2024 г. // ООО «ВЫГОН Консалтинг». URL: <http://vygon.consulting> (дата обращения: 16.08.2020).
6. Yaramasu V., Wu B., Sen P.C. High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies // Proceedings of the IEE. – 2015. – V. 103. – Iss. 5. – P. 740–788.
7. ГОСТ Р 54418.1-2012 (МЭК 61400-1:2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Ч. 1. Технические требования. – М.: Стандартинформ, 2016. – 88 с.
8. Силовая электроника в энергопреобразующей аппаратуре альтернативной энергетики / Г.Я. Михальченко, С.Г. Михальченко, А.В. Миллер, В.В. Русанов. – Электропитание. – 2016. – № 4. – С. 15–20.
9. Abir A., Mehdi D. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy // 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems. – Hammamet, Tunisia, 2017. – P. 1–6.
10. Stepsins D. Effect of frequency modulation on input current of switch-mode power converter // IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Vienna, Austria, 2013. – P. 683–688.
11. Русский В.А., Семёнов С.М., Диксон Р.К. Исследование алгоритмов поиска точки максимальной мощности для повышаю-

- шего преобразователя напряжения солнечного инвертора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 4. – С. 78–87.
12. Adaptive peak-inductor-current controlled PFM boost converter with a near-threshold startup voltage and high efficiency / H.H. Wu, C.L. Wei, Y.C. Hsu, R.B. Darling // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – V. 30. – Iss. 4. – P. 1956–1965.
 13. Sudhakar C.J., Joshi D.R. Design of DC-DC converter for wind power application // 2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems. – Chennai, India, 2019. – P. 1–4.
 14. A buck converter operating in PFM mode, mathematical model and simulation analysis / A. Morra, M. Piselli, M. Flaibani, A. Gola // INTELEC 07 – 29th International Telecommunications Energy Conference. – Rome, Italy, 2007. – P. 23–26.
 15. Side effects evaluation of switching frequency modulation in power converters / J. Mon, D. Gonzalez, J. Gago, J. Ballcells, A. Santolaria, L. Ferrer // IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. – Paris, France, 2006. – P. 1643–1648.
 16. Mikhilchenko G., Mikhilchenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleave buck converter // Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference. – Omsk, Russia, 2015. – P. 1–7. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
 17. Михальченко Г.Я., Михальченко С.Г. Математические модели импульсных систем преобразования энергии. – Томск: ТУСУР, 2013. – 138 с.
 18. Tan R.H.G., Hoo L.Y.H. DC-DC converter modeling and simulation using state space approach // 2015 IEEE Conference on Energy Conversion. – Johor Bahru, Malaysia, 2015. – P. 42–47.
 19. Shinde N., Sankad S., Patil S.L. Design and study voltage characteristics of buck converter by Matlab Simulink // 2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics. – Tirunelveli, India, 2018. – P. 680–683.
 20. Li S., Fahimi B., Kiani M. Bifurcation analysis and experimentation of peak current-controlled boost converter // IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Lisbon, Portugal, 2019. – P. 1633–1638.

Поступила 04.12.2020 г.

Информация об авторах

Михальченко С.Г., доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Михальченко Г.Я., доктор технических наук, профессор кафедры промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Семенов С.М., старший преподаватель инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Мещеряков П.С., доцент кафедры промышленной электроники Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Воронина Н.А., кандидат технических наук, доцент инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Зюзов А.М., доктор технических наук, профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Уральского федерального университета.

UDC 621.314.1:621.382.2

BIFURCATION PHENOMENA IN VOLTAGE CONVERTER WITH FREQUENCY-PULSE CONTROL FOR A WIND GENERATOR

Sergey G. Mikhailchenko¹,
msg@ie.tusur.ru

Gennady Ya. Mikhailchenko¹

Sergey M. Semenov²,
ssm@tpu.ru

Pavel S. Meshcheryakov¹,
mps@ie.tusur.ru

Nataliya A. Voronina²,
voronina@tpu.ru

Anatoliy M. Ziuzev³,
a.m.ziuzev@urfu.ru

¹ Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Ural Federal University,
19, Mira street, Ekaterinburg, 620002, Russia.

The relevance of the paper is determined by the need to improve energy efficiency parameters of power converting devices for the needs of alternative energy, in particular for a wind generator. One of the difficulties of converting wind energy is the low level of energy efficiency of this process. Due to the variable value of the rotational speed of the blades of the wind turbine in a certain time interval, the parameters of the received energy are variable, therefore, the settings of the secondary converters of electric energy must correspond to the time intervals for generating the signal. Improving the functioning of alternative power sources is possible through the use of multi-frequency stabilization modes of the converter. The article considers a model of a pulse-modulation step-down voltage converter based on pulse-frequency modulation. The authors have studied and proposed the methods for changing the width of the working zone of a single-frequency stabilization mode.

The main aim of the study is to analyze the changing modes of the secondary voltage converter of a wind generator and to develop approaches to the study of bifurcation phenomena that occur in a converter with pulse-frequency modulation by constructing a mathematical model and numerically-analytical modeling of a buck voltage converter to improve the reliability of the system under consideration.

Methods: study of literature on standard energy conversion schemes in wind turbines with an intermediate DC link; mathematical modeling and conducting numerical experiments to change the operational parameters of a buck converter with pulse-frequency modulation to identify bifurcation in it; construction of bifurcation diagrams for various parameters of the transducer in order to increase the reliability of operation.

The results. The authors obtained the mathematical models and numerical-analytical technique for constructing and identifying dynamic modes of a voltage converter with pulse-frequency modulation acting as a DC link of a wind generator set and constructed the bifurcation diagrams for voltage stabilization at different parameters of the control system. The simultaneous presence of single-frequency and burst-packed modes was shown, bifurcation of period division was identified; the influence of the system parameters on the operating modes was studied, and methods for changing the width of the working zone of the single-frequency stabilization mode were proposed.

Key words:

Wind generation, buck voltage converter, pulse-frequency modulation, switching function, bifurcation diagram, single-frequency mode of stabilization.

REFERENCES

1. GWEC Global statistic. *Official site of the Global Wind Energy Council – GWEC*. Available at: <http://gwec.net/global-figures/graphs/> (accessed 14 September 2020).
2. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 28 maya 2013 no. 449 «O mekhanizme stimulirovaniya ispolzovaniya vozobnovlyemykh istochnikov energii na optovom rynke elektricheskoy energii i moshchnosti» [Decree of the Government of the Russian Federation of May 28, 2013 no. 449 «On the mechanism for stimulating the use of renewable energy sources in the wholesale electric and power»]. *Electronic directory Garant*. Available at: <http://base.garant.ru/70388616/> (accessed 14 September 2020).
3. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 05 maya 2016 no. 850-p «O prodlennii programmy podderzhki VIE do 2024 goda» [Decree of the Government of the Russian Federation of May 05, 2016 №. 850–R «On extending the RES support program until 2024»]. *Reference system KonsultantPlyus*. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_197712/ (accessed 15 September 2020).
4. Bryzgunov I.M. Bez illyuziy. Vsyaya Pravda o perspektivakh rossiyskoy vetroindustrii [No illusions. The whole truth about the prospects of the Russian wind industry]. *Official website of the Russian Association of Wind Industry*. Available at: <https://rawi.ru/ru/bez-illyuziy-vsyaya-pravda-o-perspektivah-rossiyskoy-vetroindustrii/> (accessed 15 September 2020).

5. Zhikharev A. Otsenka effektiv realizatsii programmy podderzhki VIE do 2024 [Evaluation of the effects of implementing the RES support program until 2024]. *VYGON Consulting*. Available at: <http://vygon.consulting> (accessed 16 September 2020).
6. Yaramasu V., Wu B., Sen P.C. High-power wind energy conversion systems: state-of-the-art and emerging technologies. *Proceedings of the IEE*, 2015, vol. 103, Iss. 5, pp. 740–788.
7. GOST R 54418.1-2012 (IEC 61400-1:2005) *Vozobnovlyayemaya energetika. Vetroenergetika. Ustanovki vetroenergeticheskie. Chast 1. Tekhnicheskie trebovaniya*. [State Standart 54418.1-2012. Renewable power engineering. Wind power engineering. Wind turbines. Part 1. Technical requirements]. Moscow, StandardInform Publ., 2016. 88 p.
8. Mikhailchenko G.Y., Mikhailchenko S.G., Miller A.V., Rusanov V.V. Power electronics in energy-transforming equipment of alternative energy. *Power Supply*, 2016, Iss. 4, pp. 12–20. In Rus.
9. Abir A., Mehdi D. Control of permanent magnet generators applied to variable-speed wind-energy. *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems*. Hammamet, Tunisia, 2017, pp. 1–6.
10. Stepins D. Effect of frequency modulation on input current of switch-mode power converter. *IECON 2013 – 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Vienna, Austria, 2013, pp. 683–688.
11. Russkin V.A., Semenov S.M., Dixon R.K. Construction of the adaptive algorithm of extreme regulation of power in the system of solar energy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 4, pp. 78–87. In Rus.
12. Wu H.H., Wei C.L., Hsu Y.C., Darling R.B. Adaptive peak-inductor-current controlled PFM boost converter with a near-threshold startup voltage and high efficiency. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, Iss. 4, pp. 1956–1965.
13. Sudhakar C.J., Joshi D.R. Design of DC-DC converter for wind power application. *2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems*. Chennai, India, 2019, pp. 1–4.
14. Morra A., Piselli M., Flaibani M., Gola A. A buck converter operating in PFM mode, mathematical model and simulation analysis. *INTELEC 07 – 29th International Telecommunications Energy Conference*. Rome, Italy, 2007, pp. 23–26.
15. Mon J., Gonzalez D., Gago J., Ballcells J., Santolaria A., Ferrer L. Side effects evaluation of switching frequency modulation in power converters. *IECON 2006 – 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*. Paris, France, 2006, pp. 1643–1648.
16. Mikhailchenko G., Mikhailchenko S. Bifurcation behavior in multi-parallel interleaved buck converter. *Control and Communications (SIBCON), 2015 International Siberian Conference*. Omsk, Russia, 2015, pp. 1–7. DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147147.
17. Mikhailchenko G.Ya., Mikhailchenko S.G. *Matematicheskie modeli impulsnykh sistem preobrazovaniya energii* [Mathematical models of pulsed energy conversion systems]. Tomsk, TUSUR Publ., 2013. 138 p.
18. Tan R.H.G., Hoo L.Y.H. DC-DC converter modeling and simulation using state space approach. *2015 IEEE Conference on Energy Conversion*. Johor Bahru, Malaysia, 2015, pp. 42–47.
19. Shinde N., Sankar S., Patil S.L. Design and study voltage characteristics of buck converter by Matlab Simulink. *2018 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics*. Tirunelveli, India, 2018, pp. 680–683.
20. Li S., Fahimi B., Kiani M. Bifurcation analysis and experimentation of peak current-controlled boost converter. *IECON 2019 – 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Lisbon, Portugal, 2019, pp. 1633–1638.

Received: 4 December 2020.

Information about the authors

Sergey G. Mikhailchenko, Dr. Sc., head of Industry Electronics Department, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Gennady Ya. Mikhailchenko, Dr. Sc., professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Sergey M. Semenov, senior lecturer, National Research Tomsk Polytechnic University.

Pavel S. Meshcheryakov, associate professor, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics.

Nataliya A. Voronina, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Anatoliy M. Ziuzev, Dr. Sc., professor, Ural Federal University.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*
Корректура и перевод на английский язык *С.В. Жаркова*
Дизайн обложки *Т.В. Буланова*

Фотографии на обложке взяты из личного архива
Валерия Касаткина

Руководство для авторов и образец оформления статьи: izvestiya.tpu.ru

Подписано к печати 25.12.2020. Формат 60х84/8. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл. печ. л. 26,29. Уч.-изд. л. 23,78.
Заказ 185-20. Тираж 500 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ